

692  
4-49

В.П. Чернышов

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН  
И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ  
УСТРОЙСТВА**

Задачи и упражнения

В.П. Чернышов

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН  
И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ  
УСТРОЙСТВА**

**Задачи и упражнения**

Допущено Министерством связи СССР  
в качестве учебного пособия для техникумов связи  
специальности 0701, 0706

МОСКВА  
"РАДИО И СВЯЗЬ" 1982

ББК 32.845

Ч-49

УДК 621.371 + 621.396.67 (075.8)

**Чернышов В. П.**

**Ч-49** Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Задачи и упражнения: Учеб. пособие для техникумов. — М.: Радио и связь, 1982. — 144 с., ил.

30 к.

Даются типовые задачи с решениями и вопросы по основным разделам предмета «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства», а также задачи и упражнения для самостоятельного выполнения. Приводятся ответы на задачи и упражнения для самостоятельного решения, а также необходимый справочный материал.

Для учащихся электротехнических специальностей техникумов связи.

Ч 2402020000—003  
046(01)—82 135—82

ББК 32.845

6Ф2

РЕЦЕНЗЕНТЫ: **В. П. КОЖАРИН, Е. Л. ЧЕРЕНКОВА**

*Редакция литературы по радиосвязи, радиовещанию и телевидению*

*Виктор Петрович Чернышов*

### **РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

**Задачи и упражнения**

Редактор **В. А. Лазарева**

Обл. художника **Л. Н. Сильянова**

Худ. редактор **Р. А. Клочков**

Техн. редактор **Л. А. Горшкова**

Корректор **Т. С. Власкина**

**ИБ № 182**

Сдано в набор 26.06.81 г.

Подл. в печ. 8.10.81 г.

Т-25462 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 2 Гарнитура литературная

Печать высокая Усл. печ. л. 9,0 Усл. кр.-отг. 9,5 Уч.-изд. л. 9,26

Тираж 8000 экз. Изд. № 19124 Зак. № 85 Цена 30 к.

Издательство «Радио и связь», 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР  
101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Настоящее учебное пособие предназначено для учащихся техникумов связи по специальностям 0701 и 0706. В основу пособия положены лекции, которые читал автор в учебных заведениях Министерства связи, а также использован опыт, накопленный при строительстве и эксплуатации антенно-фидерных устройств. В пособии приведены расчетные формулы и необходимый справочный материал. Изложение построено в предположении, что учащиеся предварительно ознакомились с соответствующими разделами учебника.

Содержание примеров и задач максимально приближено к практически встречающимся случаям в условиях эксплуатации систем радиосвязи и радиовещания. Учебное пособие состоит из 16 глав. В гл. 1 рассмотрены общие вопросы распространения радиоволн. В гл. 2—5 приведены примеры расчетов напряженности полей радиоволн отдельных диапазонов. В гл. 6—9 приведены примеры расчетов, связанных с общими вопросами построения антенно-фидерных устройств. В гл. 10 рассмотрены симметричные и коаксиальные фидеры и волноводы. В гл. 11—14 приведены примеры расчетов антенн для радиосвязи и радиовещания по отдельным диапазонам волн. В гл. 15 рассмотрены эксплуатационные измерения, в гл. 16 — вопросы дипломного проектирования.

Отзывы и пожелания по книге просьба направлять в издательство «Радио и связь» по адресу: 101000, Москва, Главпочтамт, а/я № 693.

*Автор*

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\Gamma$  — коэффициент поглощения  
 $K_{б.в}$  — коэффициент бегущей волны  
 $\rho$  — коэффициент отражения  
 $\Pi$  — плотность потока мощности, Вт/м<sup>2</sup>  
 $A$  — коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $F_2$   
 $B$  — коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $E$   
 $c=3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения радиоволн в свободном пространстве  
 $C$  — емкость, Ф  
 $C_1$  — погонная емкость, Ф/м  
 $d$  — диаметр провода, расстояние между вибраторами  
 $D$  — коэффициент направленного действия антенны  
 $D_1$  — расстояние между разнополярными проводами фидера  
 $D_2$  — расстояние между однополярными проводами фидера  
 $e=2,718$  — основание натуральных логарифмов  
 $E$  — напряженность электрического поля, В/м  
 $F(\Delta)$  — множитель характеристики направленности антенны в вертикальной плоскости  
 $F(\varphi)$  — множитель характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости  
 $f$  — частота, Гц  
 $F$  — множитель ослабления  
 $G$  — коэффициент усиления антенны  
 $H, h$  — высота, м  
 $k=2\pi/\lambda$  — волновое число (коэффициент фазы)  
 $I$  — электрический ток, А  
 $L$  — индуктивность, Гн  
 $L_1$  — погонная индуктивность, Гн/м  
 $L, l$  — длина, м  
 $L_x$  — действующая длина антенны  
 $n$  — число вибраторов  
 $P$  — мощность, Вт  
 $R$  — активное сопротивление, Ом  
 $R_1$  — погонное сопротивление, Ом/м  
 $R_{\Sigma}$  — сопротивление излучения, Ом  
 $R_э=6370$  км — радиус Земли  
 $r$  — расстояние  
 $S$  — площадь, м<sup>2</sup>  
 $t$  — время, с  
 $T$  — температура  
 $U$  — напряжение, В

$v$  — скорость распространения волны, м/с  
 $W$  — волновое сопротивление, Ом  
 $X$  — реактивное сопротивление, Ом  
 $Y$  — полная проводимость  
 $Z$  — полное сопротивление, Ом  
 $\alpha$  (альфа) — коэффициент затухания  
 $\delta$  (дельта) — коэффициент поглощения  
 $\Delta$  (дельта) — угол, отсчитываемый в вертикальной плоскости  
 $\epsilon$  (эпсилон) — диэлектрическая проницаемость среды  
 $\epsilon_0=1/36\pi \cdot 10^9$ , Ф/м — диэлектрическая проницаемость свободного пространства  
 $\epsilon'=\epsilon/\epsilon_0$  — относительная диэлектрическая проницаемость  
 $\eta$  (эта) — коэффициент полезного действия  
 $\Theta$  (тэта) — центральный угол  
 $\lambda$  (лямбда) — длина волны  
 $\mu$  (мю) — магнитная проницаемость, Гн/м  
 $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость свободного пространства и воздуха  
 $\mu'=\mu/\mu_0$  — относительная магнитная проницаемость  
 $\nu$  (ню) — коэффициент использования поверхности раскрыва  
 $\xi$  (кси) — коэффициент укорочения волны  
 $\pi=3,14$  рад или 180°  
 $\rho$  (ро) — удельное сопротивление, Ом·м/мм<sup>2</sup>  
 $\Sigma$  (сигма) — сумма  
 $\sigma$  (сигма) — удельная проводимость, См/м  
 $\varphi$  (фи) — угол, отсчитываемый в горизонтальной плоскости  
 $\psi$  (пси) — угол сдвига фазы  
 $\omega$  (омега) — угловая частота  
АДГ — антенна двухзеркальная с гиперболическим переизлучателем  
АДЭЭ — антенна двухзеркальная с эллиптическим переизлучателем  
АРРТ — антенна с регулируемым распределением тока  
АТВК — антенна телевизионная волновой канал  
БС — антенна бегущей волны с активными сопротивлениями связи  
ВГД — вибратор горизонтальный диапазонный (диполь Надененко)  
ВГДШ — вибратор горизонтальный диапазонный шунтовой  
ЛПА — логопериодическая антенна  
РГ — ромбическая горизонтальная антенна  
РГД — двойная ромбическая горизонтальная антенна  
РПА — рупорно-параболическая антенна  
СВ — средневолновая синфазная антенна  
СГД—РА — синфазная горизонтальная диапазонная антенна с аперриодическим рефлектором  
СГД—РАД — синфазная горизонтальная диапазонная антенна с активным диапазонным рефлектором  
СГД—РН — синфазная горизонтальная диапазонная антенна с настроенным рефлектором  
ТФ — трансформатор фидерный

## ГЛАВА 1

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

#### 1.1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

По Регламенту радиосвязи частоты от 3 кГц до 3 ТГц относятся к радиоспектру. Частота и длина волны в свободном пространстве связаны уравнением

$$\lambda = c/f, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  — длина волны, м;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения радиоволн в свободном пространстве;  $f$  — частота, Гц. В табл. 1.1 приведено распределение радиоспектра по диапазонам, даны названия диапазонов и принятые их сокращенные обозначения.

Таблица 1.1

Радиоспектр	Метрическое название диапазона волн	Сокращенное обозначение	
		русское	международное
От 3 до 30 кГц	Мириаметровые волны	ОНЧ	VLF
От 30 до 300 кГц	Километровые волны	НЧ	LF
От 300 до 3000 кГц	Гектометровые волны	СЧ	MF
От 3 до 30 МГц	Декаметровые волны	ВЧ	HF
От 30 до 300 МГц	Метровые волны	ОВЧ	VHF
От 300 до 3000 МГц	Дециметровые волны	УВЧ	UHF
От 3 до 30 ГГц	Сантиметровые волны	СВЧ	SHF
От 30 до 300 ГГц	Миллиметровые волны	КВЧ	EHF
От 300 до 3000 ГГц	Дециметровые волны		

Магнитная и электрическая составляющие напряженности поля электромагнитной волны связаны уравнением

$$H = E/120\pi, \quad (1.2)$$

где  $H$  — напряженность магнитной составляющей поля, А/м;  $E$  — напряженность электрической составляющей поля, В/м;  $120\pi$  — характеристическое сопротивление свободного пространства, Ом.

Поток мощности, проходящий через квадратный метр поверхности фронта волны (вектор Пойнтинга),

$$P = E^2_{д}/120\pi, \quad (1.3)$$

где  $P$  — плотность потока мощности, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{д}$  — действующее значение напряженности поля, В/м.

Напряженность поля при распространении в свободном пространстве

$$E_{д} = 173\sqrt{PD}/r, \quad (1.4)$$

где  $E_{д}$  — действующее значение напряженности поля, мВ/м;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $D$  — коэффициент направленного действия антенны;  $r$  — расстояние, км.

Формула (1.4) может быть записана в виде

$$E_{д} = \sqrt{30PD}/r,$$

где  $P$  — мощность излучения, Вт;  $r$  — расстояние, м.

#### 1.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕДАХ

Изменение амплитуд поля при распространении плоской волны с расстоянием

$$E_x = E_0 e^{-\delta x}, \quad (1.5)$$

где  $E_0$  — напряженность поля в начале отсчета расстояния;  $\delta$  — коэффициент поглощения;  $x$  — расстояние.

Среды, по своим свойствам приближающиеся к идеальному диэлектрику, удовлетворяют условию

$$\epsilon' \gg 60\lambda\sigma. \quad (1.6)$$

Для таких сред скорость распространения волны

$$v = c/\sqrt{\epsilon'}; \quad (1.7)$$

коэффициент поглощения

$$\delta = 60\lambda\sigma/\sqrt{\epsilon'}. \quad (1.8)$$

Среды, по своим свойствам приближающиеся к проводнику, удовлетворяют условию

$$\epsilon' \ll 60\lambda\sigma. \quad (1.9)$$

Для таких сред скорость распространения волны

$$v = c/\sqrt{30\sigma\lambda}; \quad (1.10)$$

коэффициент поглощения

$$\delta = 2\pi\sqrt{30\sigma\lambda}. \quad (1.11)$$

В (1.9)  $\epsilon'$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\sigma$  — удельная проводимость среды.

#### 1.3. ПРОСТРАНСТВО, ЭФФЕКТИВНО УЧАСТВУЮЩЕЕ В ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ

*Принцип Гюйгенса.* Волна, создаваемая реальным источником «0», на основании принципа Гюйгенса может быть представлена суммой волн, которые бы создавали в этой точке фиктивные (во-



ображаемые) источники, непрерывно расположенные по поверхности фронта волны  $S$  (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Принцип Гюйгенса

**Зоны Френеля.** Источник «0» возбуждает сферический фронт волны  $S$  (рис. 1.2). В точке приема  $n$  волна, прошедшая путь  $Om$ , равный  $L_1 + L_2$ , имеет фазу, которая принимается за нулевую.

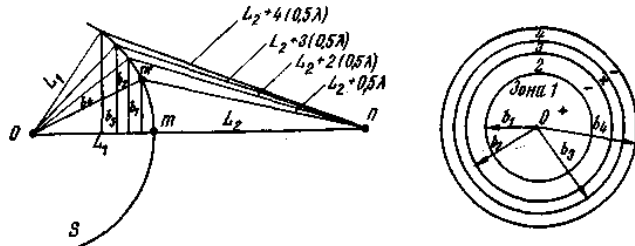


Рис. 1.2. Зоны Френеля

Волна, прошедшая путь  $Om'n$ , равный  $L_1 + L_2 + 0,5\lambda$ , будет иметь фазу, отличающуюся от нулевой на  $\pi$ . Волны, пришедшие с участка фронта  $S$ , ограниченные радиусами от 0 до  $b_1$ , вызывают увеличение суммарного поля в точке приема. Эта область называется первой зоной Френеля. Волны, прошедшие область, ограниченную радиусами, большими  $b_1$ , но меньшими  $b_2$ , имеют фазу в точке приема от  $\pi$  до  $2\pi$ . Такая зона называется второй зоной Френеля. Аналогично определяются номера последующих зон, отличающихся по сдвигу фаз на  $\pi$ . На рис. 1.3 показано значение суммарной

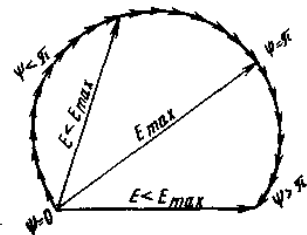


Рис. 1.3. Суммарное поле при различных фазовых сдвигах между первым и последним слагаемыми

напряженности поля волн, приходящих в точку приема с различными фазами. Суммарное поле оказывается максимальным в том случае, когда разность по фазе между первым и последним слагаемыми равна  $\pi$ . Нечетные зоны увеличивают суммарное поле, четные — ослабляют.

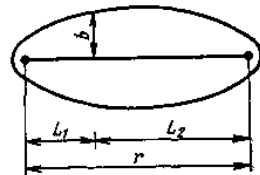


Рис. 1.4. Область пространства, эффективно участвующая в передаче энергии радиоволны

Область пространства, эффективно участвующая в передаче энергии радиоволны, определяется первой зоной Френеля, радиус которой

$$b = \sqrt{L_1 L_2 \lambda / (L_1 + L_2)}. \quad (1.12)$$

Смысл величин, входящих в данную формулу, понятен из рис. 1.4.

Для середины трассы радиус зоны Френеля максимальный:

$$b_{max} = \sqrt{0,25r\lambda}. \quad (1.13)$$

#### 1.4. ПРОФИЛЬ ТРАССЫ

Поверхность Земли криволинейна и с увеличением расстояния в большей степени затеняет область пространства, существенно участвующую в передаче энергии. Для расчета поля земной волны необходимо учитывать профиль трасс. Для построения этого профиля пользуются параболическим масштабом, в котором все высоты откладываются по оси ординат, а расстояния — по оси абсцисс. Условный нулевой уровень, от которого отсчитываются высоты,

$$h_x = \frac{r^2}{2R_B} \frac{r_x}{r} \left(1 - \frac{r_x}{r}\right), \quad (1.14)$$

где  $R_B = 6370$  км — радиус Земли;  $r$  — расстояние между пунктами приема и передачи;  $r_x$  — расстояние до рассматриваемой точки (рис. 1.5). При построении профиля масштабы по оси высот и оси расстояний могут быть разными.

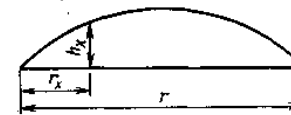


Рис. 1.5. Построение условного нулевого уровня

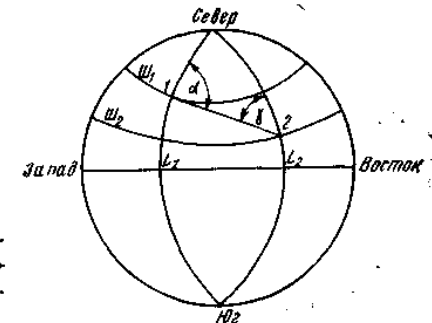


Рис. 1.6. Углы сферического треугольника

#### 1.5. АЗИМУТ И РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПУНКТАМИ РАДИОСВЯЗИ ПО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Угол, образованный направлениями линии радиосвязи и северного земного меридиана, называют азимутом. Северное направление имеет азимут  $0^\circ$ , восточное —  $90^\circ$ , южное —  $180^\circ$ , западное —  $270^\circ$ . При нормальном состоянии ионосферы направление линии радиосвязи (ее проекция на поверхность земли) в горизонтальной плоскости совпадает с направлением дуг большого круга. Стацио-

нарные направленные антенны устанавливаются в соответствии с азимутом линии радиосвязи. Азимут линии радиосвязи определяется уравнениями:

$$\cos \Theta = \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2 + \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2 \cos (L_2 - L_1); \quad (1.15)$$

$$\sin \alpha = [\cos \vartheta_2 \sin (L_2 - L_1)] : \sin \Theta; \quad (1.16)$$

$$\sin \gamma = [\cos \vartheta_1 \sin (L_2 - L_1)] : \sin \Theta, \quad (1.17)$$

где  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  и  $L_1$ ,  $L_2$  — географические широты и долготы пунктов радиосвязи;  $\alpha$  и  $\gamma$  — углы сферического треугольника, смысл которых ясен из рис. 1.6.

Установку антенн на местности по азимуту осуществляют привязкой к геодезической сети ее геодезическим знаком. Слабонаправленные антенны могут ориентироваться по магнитному меридиану. Следует учитывать, что земной меридиан отличается от магнитного за счет магнитного склонения, которое для каждой местности различно. Расхождение между земным и магнитным меридианами может превышать  $10^\circ$ .

Расстояние между пунктами радиосвязи по земной поверхности определяется уравнением

$$r = 111\Theta, \quad (1.18)$$

где  $r$  — расстояние, км;  $\Theta$  — центральный угол в градусах.

Пример 1.1. Действующее значение напряженности магнитной составляющей поля плоской электромагнитной волны  $H_d = 13$  мкА/м. Определить плотность потока мощности при распространении волны в свободном пространстве.

Решение. Действующее значение напряженности электрической составляющей поля волны определим из (1.2):

$$H = E/120\pi; E_d = H_d/120\pi = 13 \cdot 10^{-6} \cdot 120 \cdot 3,14 = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ В/м},$$

$$E_d = 4,9 \text{ мВ/м}.$$

Плотность потока мощности (1.3)

$$P = E_d^2/120\pi = (4,9 \cdot 10^{-3})^2/120 \cdot 3,14 = 63,7 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_d = 63,7 \text{ нВт/м}^2.$$

Пример 1.2. Определить напряженность поля на расстоянии 1000 км при распространении в свободном пространстве, если мощность излучения составляет 100 Вт, а коэффициент направленного действия антенны равен 1000.

Решение. Действующее значение напряженности поля (1.4)

$$E_d = 173 \sqrt{PD}/r = 173 \sqrt{0,1 \cdot 1000/1000} = 1,73 \text{ мВ/м}.$$

Пример 1.3. Определить, во сколько раз уменьшится амплитуда напряженности поля волны с частотой 60 кГц на расстоянии 10 м при распространении в морской воде.

Решение. Длина волны в свободном пространстве

$$\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/60 \cdot 10^3 = 5000 \text{ м}.$$

Для морской воды  $\epsilon' = 80$ ;  $\sigma = 4$  См/м;  $60\lambda\sigma = 60 \cdot 5000 \cdot 4 = 1,2 \cdot 10^6$ ;  $\epsilon' \ll 60\lambda\sigma$ .

Для частоты 60 кГц морская вода по своим свойствам приближается к проводнику. Коэффициент поглощения для такой среды  $\delta = 2\pi \sqrt{30\sigma/\lambda} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{30 \cdot 4/5000} = 0,97$ .

Уменьшение амплитуды поля определим из (1.5):

$$E_x = E_0 e^{-\delta x}; E_0/E_x = e^{\delta x} = e^{0,97 \cdot 10} = e^{9,7} = 16 \ 300.$$

Пример 1.4. Определить, во сколько раз уменьшится амплитуда напряженности поля при распространении в сухой почве на расстояние 2 м. Длина волны в свободном пространстве 2 м.

Решение. Для сухой почвы  $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м;  $60\lambda\sigma = 60 \cdot 2 \cdot 0,001 = 0,12$ ;  $\epsilon' \gg 60\lambda\sigma$ . Сухая почва для частоты 150 МГц ( $\lambda = 2$  м) может по своим свойствам рассматриваться как диэлектрик. Коэффициент поглощения для такой среды (1.8)

$$\delta = 60\pi\sigma/\sqrt{\epsilon'} = 60 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3}/\sqrt{4} = 0,0942.$$

Решая (1.5) относительно  $E_0/E_x$ , имеем:

$$E_0/E_x = e^{\delta x}; \delta x = 0,0942 \cdot 2 = 0,19; e^{\delta x} = e^{0,19} = 1,2.$$

Напряженность поля на расстоянии 2 м уменьшится в 1,2 раза.

Пример 1.5. Определить радиус первой зоны Френеля для середины трассы протяженностью 40 км при работе на частоте 6 ГГц.

Решение. Длина волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/6 \cdot 10^9 = 0,05$  м.

Радиус первой зоны Френеля (1.13)

$$b_{\max} = \sqrt{0,25r\lambda} = \sqrt{0,25 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,05} = 22,36 \text{ м}.$$

Пример 1.6. Построить профиль трассы протяженностью 40 км по данным рис. 1.7а. Высота мачты в пункте А 50 м, в пункте В 40 м. Линиями, пересекающими трассу, на рисунке изображены горизонталы, а цифры указывают их высоты над уровнем моря.

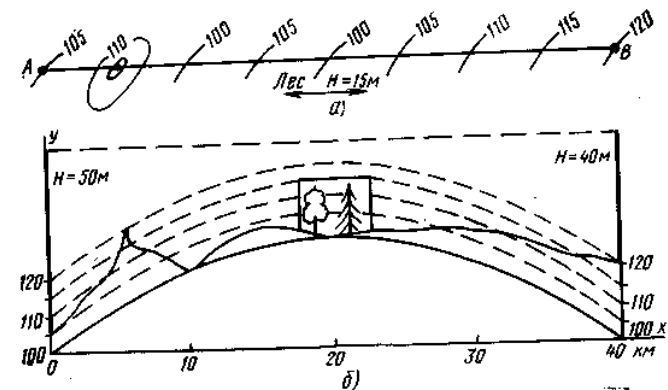


Рис. 1.7. Профиль трассы примера 1.6

те В 40 м. Линиями, пересекающими трассу, на рисунке изображены горизонталы, а цифры указывают их высоты над уровнем моря.

Решение. Для расчета профиля условного нулевого уровня используем (1.14). Построение выполним по пяти точкам:  $r_x=0$ ; 10; 20; 30 и 40 км. Для  $r_x=10$  км

$$h_x = \frac{r^2}{2R_3} \frac{r_x}{r} \left( 1 - \frac{r_x}{r} \right),$$

$$h_x = \frac{40\,000^2}{2 \cdot 6370} \frac{10}{40} \left( 1 - \frac{10}{40} \right) = 0,0235 \text{ км} = 23,5 \text{ м.}$$

Масштабы по оси высот примем 1 : 2000; по оси расстояний 1 : 500 000. Результаты расчета следующие:

$r$ , км	0	10	20	30	40
$h_x$ , м	0	23,5	31,4	23,5	0
$x$ , мм	0	20	40	60	80
$y$ , мм	0	11,7	15,7	11,7	0

За условный нулевой уровень примем горизонталь с высотой 100 м относительно уровня моря. Над этим уровнем построим все высоты, взятые с карты трассы рис. 1.7а. Построение профиля выполнено на рис. 1.7б.

Пример 1.7. Координаты пункта 1: широта  $56^\circ N$ , долгота  $38^\circ W$ ; пункта 2: широта  $47^\circ N$ , долгота  $52^\circ W$ . Определить азимуты линии радиосвязи и ее протяженность.

Решение. При определении азимутов линии радиосвязи и ее протяженности используем уравнения (1.15), (1.16), (1.17), и (1.18):

$$\cos \Theta = \sin \text{Ш}_1 \sin \text{Ш}_2 + \cos \text{Ш}_1 \cos \text{Ш}_2 \cos (L_2 - L_1) = \\ = \sin 56^\circ \sin 47^\circ + \cos 56^\circ \cos 47^\circ \cos (52^\circ - 38^\circ) = 0,975;$$

$$\Theta = 12^\circ 10' = 12,16^\circ;$$

$$\sin \alpha = \cos \text{Ш}_1 \sin (L_2 - L_1) / \sin \Theta = \cos 56^\circ \sin (52^\circ - 38^\circ) / \sin 12^\circ 10' = \\ = 0,505; \alpha = 30^\circ 20';$$

$$\sin \gamma = \cos \text{Ш}_2 \sin (L_2 - L_1) / \sin \Theta = \cos 47^\circ \sin (52^\circ - 38^\circ) / \sin 12^\circ 10' = \\ = 0,615; \gamma = 37^\circ 55'.$$

Азимут установки антенны из пункта 1 в пункт 2 (см. рис. 1.6)  $180^\circ - \alpha = 180^\circ - 30^\circ 20' = 149^\circ 40'$ .

Азимут линии радиосвязи из пункта 2 в пункт 1  $360^\circ - \gamma = 360^\circ - 37^\circ 55' = 322^\circ 05'$ .

Протяженность линии радиосвязи по земной поверхности определим по (1.18):

$$r = 111\Theta = 111 \cdot 12,16 = 1350 \text{ км.}$$

Задача 1.1. Известна плотность потока мощности. Определить действующее значение напряженности электрической составляющей поля электромагнитной волны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
П, пВт/м <sup>2</sup>	4,24	6,62	9,53	13	15	17

Задача 1.2. Определить напряженность поля при распространении радиоволны в свободном пространстве, если известны мощность излучения, коэффициент направленного действия антенны и расстояние.

Вариант	а	б	в	г	д	е
P, Вт	200	1000	4000	5000	5000	9000
D	20	4	4	12,8	2	10
r, км	346	100	50	100	40	100

Задача 1.3. Определить коэффициент поглощения, если известны частота и параметры среды.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\epsilon'$	10	4	80	10	4	80
$\sigma$ , См/м	0,01	0,001	4	0,01	0,001	4
f, кГц	300	30000	20	200	60000	30

Задача 1.4. Заданы частота и протяженность трассы. Определить радиус первой зоны Френеля для середины трассы.

Вариант	а	б	в	г	д	е
f, ГГц	4	6	7,5	2	6	7,5
r, км	35	40	45	20	35	40

Задача 1.5. Для построения в параболическом масштабе профиля трассы рассчитать условный нулевой уровень по заданному расстоянию между двумя пунктами.

Вариант	а	б	в	г	д	е
r, км	32	36	44	48	52	56

Задача 1.6. Известна напряженность поля, определить плотность потока мощности.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$E_x$ , мВ/м	37,7	0,54	151	0,19	187	472

Задача 1.7. Известна напряженность поля, определить плотность потока мощности.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$E_x$ , мкВ/м	471	125	75,4	264	538	628

Задача 1.8. Определить мощность излучения, если известны коэффициент направленного действия антенны, расстояние и напряженность поля при распространении в свободном пространстве.

Вариант	а	б	в	г	д	е
D	100	50	10	75	10	30
r, км	1000	500	100	25	300	200
E, мкВ/м	144	216	192	173	576	432

Задача 1.9. Определить коэффициент поглощения, если известны длина волны и параметры среды.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , м	15	1250	15 000	5	1500	20 000
$\epsilon'$	4	10	80	4	10	80
$\sigma$ , См/м	0,001	0,01	4	0,001	0,01	4

Задача 1.10. Заданы длина волны и протяженность трассы. Определить области пространства, эффективно участвующие в пе-



передаче энергии волны на расстояниях, равных одной четверти и трем четвертям протяженности трассы.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , см	100	50	20	6	15	8
$r$ , км	16	32	20	36	52	32

**Задача 1.11.** Определить напряженность поля, если известны: частота, параметры среды, в которой распространяется волна, и длина пути пройденная волной. Начальная напряженность поля равна 1 В/м.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , кГц	300	30 000	20	200	60 000	30
$\epsilon'$	10	4	80	10	4	80
$\sigma$ , См/м	0,01	0,001	4	0,01	0,001	4
$x$ , м	2	10	10	1,5	2	15

**Задача 1.12.** Определить скорость распространения волны в поглощающей среде по условиям задачи 1.9.

**Задача 1.13.** Определить длину волны в поглощающей среде по условиям задачи 1.9.

## ГЛАВА 2

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ САНТИМЕТРОВЫХ, ДЕЦИМЕТРОВЫХ И МЕТРОВЫХ ВОЛН

Сантиметровые (СВЧ), дециметровые (УВЧ) и метровые (ОВЧ) волны распространяются на расстояния, лишь незначительно превышающие дальность прямой видимости, которая без учета атмосферной рефракции определяется формулой

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (2.1)$$

где  $r_0$  — дальность прямой видимости, км;  $h_1$  и  $h_2$  — высоты передающей и приемной антенн, м.

При распространении радиоволн в тропосфере происходит искривление их траекторий за счет рефракции, обусловленной изменением диэлектрической проницаемости воздуха по высоте. При нормальной атмосферной рефракции дальность прямой видимости увеличивается и для диапазонов СВЧ, УВЧ и ОВЧ определяется формулой

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.2)$$

Ограниченный радиус действия и широкий диапазон частот позволяют использовать СВЧ, УВЧ и ОВЧ для радиовещания (звукового и телевизионного), многоканальной радиосвязи, радиоастрономии и других целей.

При распространении в пределах прямой видимости при поднятых антеннах приемную антенну достигают два луча — прямой луч и луч, отраженный от поверхности земли. В общем случае пря-

мой и отраженный лучи могут как усиливать друг друга, так и ослаблять.

Напряженность поля в пределах прямой видимости, когда  $r \leq 0,8r_0$ , рассчитывается по формуле

$$E_d = (173/r) \sqrt{PD} \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos(\Phi + 2\pi\Delta r/\lambda)}, \quad (2.3)$$

где  $E_d$  — действующее значение напряженности поля, мВ/м;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $D$  — коэффициент направленного действия передающей антенны;  $R$  — коэффициент отражения от Земли;  $\Phi$  — угол потери фазы при отражении;

$$\Delta r = 2mh_1h_2/r \quad (2.4)$$

— разность хода между прямой волной и волной, отраженной от Земли;  $m$  — коэффициент (определяется по кривым рис. 2.1), зависящий от отношения  $h_2/h_1$  (где  $h_1 > h_2$ ) и параметра

$$q = r/\sqrt{2R_3 h_1}. \quad (2.5)$$

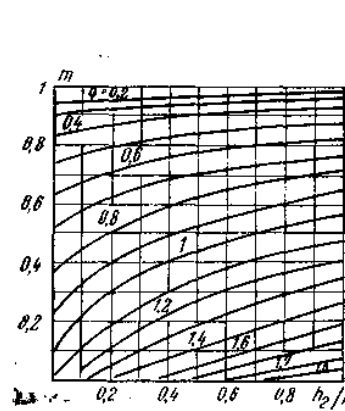


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента  $m$  от параметров  $h_2/h_1$  и  $q = r/\sqrt{2R_3 h_1}$

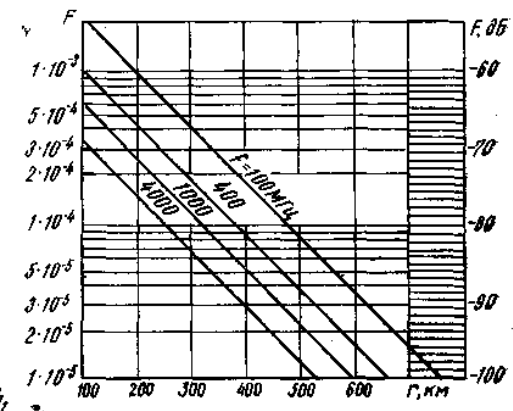


Рис. 2.2. Зависимость множителя ослабления от частоты и расстояния

При малых углах излучения, соответствующих расстояниям  $r \geq 4h_1h_2/\lambda$ , коэффициент отражения  $R=1$ ,  $\Phi=\pi$  и формула (2.3) примет вид

$$E_d = (346/r) \sqrt{PD} \sin(2\pi mh_1h_2/\lambda r). \quad (2.6)$$

В данной формуле знак функции синуса не учитывается, в аргументе синуса расстояние, высоты антенн и длина волны берутся в одинаковых единицах.

Для расстояний  $0,8r_0 \geq r \geq 18h_1h_2/\lambda$  расчет напряженности поля проводят по формуле

$$E_d = \frac{2,18 \sqrt{PD} m h_1 h_2}{r^2 \lambda}, \quad (2.7)$$

где  $E_d$  — в мВ/м;  $r$  — в км;  $\lambda$  и  $h$  — в м.



В зоне тени, когда  $r > r_0$ , действующее значение напряженности поля рассчитывается по формуле

$$E_d = (173/r) \sqrt{P D F}, \quad (2.8)$$

где  $E_d$  — в мВ/м;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $D$  — коэффициент направленного действия антенны;  $F$  — дифракционный множитель ослабления, определяемый по кривым рис. 2.2.

Радиосвязь наземных пунктов через спутники возможна только на волнах, испытывающих слабое поглощение при прохождении через ионосферу и тропосферу. На частотах выше 6 ГГц появляются потери за счет поглощения в газах, возрастающие с частотой, достигающие 4—8 дБ на частоте 10 ГГц.

При прохождении ионосферы, из-за наличия магнитного поля Земли, волна испытывает поворот плоскости поляризации, ее вращение. С увеличением частоты угол поворота плоскости поляризации уменьшается. Для исключения замираний сигнала, вызванных изменением плоскости поляризации в космической радиосвязи, применяют круговую поляризацию.

Связь наземных станций со спутниками в целях обеспечения минимальных потерь должна осуществляться в диапазоне 0,1—6 ГГц круговой поляризации. Малые напряженности поля, создаваемые спутниками у поверхности Земли, вызывают необходимость применять направленные антенны, требующие ориентации на спутник. При связи через геосинхронный спутник азимут установки наземных антенн определяется уравнениями (1.15) — (1.17). Угол излучения  $\varphi$ , образованный направлениями со спутника на пункт приема и центр Земли (рис. 2.3), связан с центральным углом  $\Theta$  уравнением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_3 \sin \Theta}{H_c + R_3 (1 - \cos \Theta)}, \quad (2.9)$$

где  $R_3$  — радиус Земли;  $H_c$  — высота спутника над поверхностью Земли.

Угол прихода волны в вертикальной плоскости  $\Delta$  на приемную станцию определяется уравнением

$$\Delta = 90^\circ - \Theta - \varphi. \quad (2.10)$$

Расстояние между наземной станцией и спутником

$$r_c = R_3 \sin \Theta / \sin \varphi. \quad (2.11)$$

Время запаздывания сигнала при распространении в одном направлении от спутника до наземного пункта (или в обратном направлении) определяется уравнением

$$t_3 = r_c / c, \quad (2.12)$$

где  $c$  — скорость распространения радиоволн в свободном пространстве.

Напряженность поля на трассе спутник — Земля рассчитывают по (2.8), в которой значение множителя ослабления для различ-

ных углов прихода волны  $\Delta$  в зависимости от частоты определяются по кривым рис. 2.4.

Пример 2.1. Система космической связи имеет центральный угол  $50^\circ$ , высоту спутника 36 000 км, мощность излучения бортового передатчика 300 Вт, коэффициент направленного действия

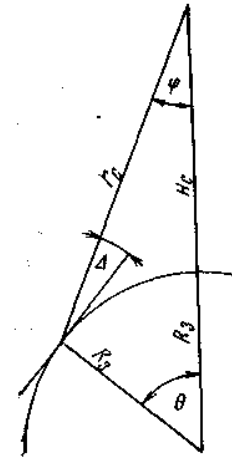


Рис. 2.3. К определению угла прихода волны в вертикальной плоскости при спутниковой связи

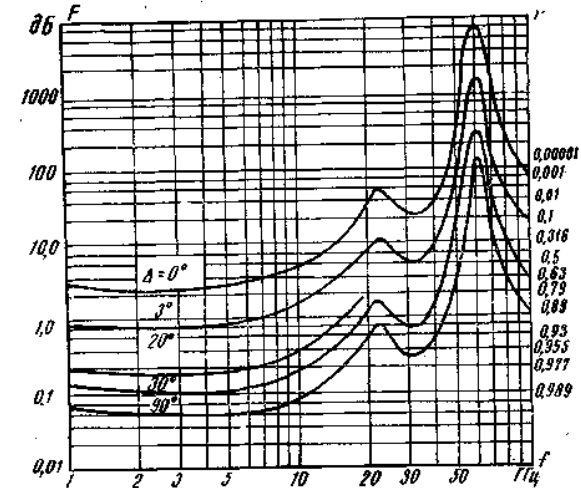


Рис. 2.4. Зависимость множителя ослабления от частоты на трассе спутник — Земля

антенны в направлении на приемный пункт 10, связь осуществляется на частоте 1 ГГц. Определить напряженность поля.

Решение. Угол излучения определим по (2.9):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_3 \sin \Theta}{H_c + R_3 (1 - \cos \Theta)} = \frac{6370 \sin 50^\circ}{36\,000 + 6370 (1 - \cos 50^\circ)} = 0,127; \varphi = 7^\circ.$$

Угол прихода волны определим по (2.10):

$$\Delta = 90^\circ - \Theta - \varphi = 90^\circ - 50^\circ - 7^\circ = 33^\circ.$$

Протяженность трассы определяется (2.11):

$$r_c = R_3 \sin \Theta / \sin \varphi = 6370 \sin 50^\circ / \sin 7^\circ = 38\,700 \text{ км}$$

По кривой  $\Delta = 30^\circ$  (см. рис. 2.4) находим множитель ослабления  $F = 0,98$ . Напряженность поля определим по (2.8):

$$E_d = (173/38\,700) \sqrt{0,3 \cdot 10 \cdot 0,98} = 7,58 \cdot 10^{-3} \text{ мВ/м} = 7,58 \text{ мкВ/м}.$$

Пример 2.2. Передающая станция имеет мощность излучения 10 кВт, коэффициент направленного действия антенны 10, работает на волне 1,5 м при высоте установки антенны 200 м. Определить напряженность поля на высоте 10 м при удалении от передающей станции на 10 км.

Решение. Расстояние прямой видимости (2.2)

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4,12(\sqrt{200} + \sqrt{10}) = 71,27 \text{ км.}$$

Радиус освещенной зоны  $0,8r_0 = 0,8 \cdot 71,27 = 57 \text{ км.}$

Для отношения  $h_2/h_1 = 10/200 = 0,05$  и параметра  $q = r/\sqrt{2R_3h_1} = 10/\sqrt{2 \cdot 6370 \cdot 0,2} = 0,2$  по кривой рис. 2.1 находим параметр  $m = 0,96$ .

Параметр  $4h_1h_2/\lambda = 4 \cdot 200 \cdot 10/1,5 = 5333 \text{ м} = 5,33 \text{ км}; r = 10 \text{ км} > 5,33 \text{ км.}$  Данное неравенство позволяет для определения напряженности поля воспользоваться формулой (2.6):

$$E_d = \frac{346 \sqrt{PD}}{r} \sin \frac{2\pi mh_1h_2}{\lambda r} = \frac{346 \sqrt{10 \cdot 10}}{10} \sin \frac{360 \cdot 0,96 \cdot 200 \cdot 10}{1,5 \cdot 1000} = 346 \sin 46,08^\circ = 249,6 \text{ мВ/м.}$$

Пример 2.3. Определить напряженность электрического поля, создаваемого на расстоянии 30 км антенной, поднятой на высоту 160 м с коэффициентом направленного действия 10 при мощности излучения 5 кВт при работе на волне 5 м. Приемная антенна поднята на высоту 10 м.

Решение. Расстояние прямой видимости (2.2)

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4,12(\sqrt{160} + \sqrt{10}) = 65 \text{ км.}$$

Для отношения  $h_2/h_1 = 10/160 = 0,065$  по кривой параметра  $q = r/\sqrt{2R_3h_1} = 30/\sqrt{2 \cdot 6370 \cdot 0,16} = 0,666$  рис. 2.1 находим коэффициент  $m = 0,6$ .

Параметр  $18h_1h_2/\lambda = 18 \cdot 160 \cdot 10/5 = 5760 \text{ м} = 5,76 \text{ км.}$

Так как  $30 > 5,76$ , расчет напряженности электрического поля выполним по (2.7):

$$E_d = 2,18 \sqrt{PDmh_1h_2/r^2\lambda} = 2,18 \sqrt{5 \cdot 10 \cdot 0,6 \cdot 160 \cdot 10/30^2 \cdot 5} = 3,286 \text{ мВ/м.}$$

Пример 2.4. Мощность излучения 15 кВт, коэффициент направленного действия антенны 8, высота расположения передающей антенны 150 м, приемной — 10, частота 96 МГц. Определить напряженность поля на расстоянии 200 км.

Расстояние прямой видимости (2.2)

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4,12(\sqrt{150} + \sqrt{10}) = 63,48 \text{ км;}$$

$r = 200 > r_0 = 63,48 \text{ км.}$  Расчет в области тени выполним по (2.8).

Множитель ослабления для  $r = 200 \text{ км}$  найдем по кривой  $f = 100 \text{ МГц}$  рис. 2.2;  $F = 10^{-3}$ ;  $E_d = (170/r) \sqrt{PD} F = (170/200) \sqrt{15 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 9,47 \cdot 10^{-3} \text{ мВ/м; } E_d = 9,47 \text{ мкВ/м.}$

Задача 2.1. Заданы высоты приемной и передающей антенн. Определить расстояние прямой видимости при нормальной рефракции.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$h_1, \text{ м}$	180	200	250	300	350	500
$h_2, \text{ м}$	10	10	10	10	10	10

Задача 2.2. Определить разность хода между прямой волной и волной, отраженной от Земли, если известны высоты антенн и расстояние между ними.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$h_1, \text{ м}$	120	200	150	300	150	200
$h_2, \text{ м}$	30	20	30	20	10	15
$r, \text{ км}$	2	3	2	3	1	1,5

Задача 2.3. Известны: мощность излучения, КНД передающей антенны, высоты установки антенн, длина волны; расстояние. Определить напряженность поля.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$P, \text{ кВт}$	5	5	5	10	10	10
$D$	10	10	4	5	5	5
$h_1, \text{ м}$	100	150	110	150	150	200
$h_2, \text{ м}$	20	50	50	20	10	20
$\lambda, \text{ м}$	1,48	1,42	4,84	3,75	3,41	3,15
$r, \text{ км}$	10	30	8	6	3	10

Задача 2.4. Известны: мощность излучения, КНД передающей антенны, высоты установки антенн, длина волны, расстояние. Определить напряженность поля.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$P, \text{ кВт}$	5	20	10	5	5	10
$D$	10	5	8	10	4	5
$h_1, \text{ м}$	150	150	200	100	100	150
$h_2, \text{ м}$	50	20	20	15	50	10
$\lambda, \text{ м}$	1,42	3,75	3,15	1,48	4,84	3,41
$r, \text{ км}$	60	45	50	40	50	40

Задача 2.5. Известны: мощность излучения, КНД передающей антенны, высоты установки антенн, длина волны, расстояние. Определить напряженность поля.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$P, \text{ кВт}$	5	5	5	10	15	25
$D$	10	10	4	5	10	10
$h_1, \text{ м}$	100	150	100	150	150	200
$h_2, \text{ м}$	20	55	50	20	10	20
$\lambda, \text{ м}$	1,48	1,42	4,84	3,75	3,41	3,15
$r, \text{ км}$	200	250	150	200	250	250

Задача 2.6. Известен центральный угол между направлениями на спутник и пункт приема. Определить угол излучения со спутника и угол прихода волны в вертикальной плоскости в пункте приема если спутник находится на высоте 36 000 км над поверхностью Земли. Какова протяженность трассы от поверхности Земли.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Центральный угол, град	35	40	45	48	50	52

Задача 2.7. Определить время запаздывания сигнала на трассе спутник — Земля по условиям задачи 2.6.

Задача 2.8. Известна частота, определить множитель ослабления на трассе спутник — Земля по условиям задачи 2.6.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f, \text{ ГГц}$	2	6	10	20	30	50

## ГЛАВА 3

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН

Декаметровыми называют волны от 10 до 100 м (3—30 МГц). Распространение декаметровых волн на большие расстояния обусловлено отражениями от ионизированных слоев и Земли. На распространение декаметровых волн существенное влияние оказывают ионизированные слои (области)  $D$ ,  $E$ ,  $F_1$  и  $F_2$ . Слой  $D$  и  $E$  вызывают частичное поглощение волн, а слои  $F_1$  и  $F_2$  (реже  $E$ ) — преломление и отражение.

Некоторые параметры ионосферных слоев

Таблица 3.1

Слой	$D$	$E$	$F_1$	$F_2$
$H_c$ , км	50—80	100—120	160—230	220—400
$N_{max}$ , эл/см <sup>3</sup>	$10^2$ — $10^3$	$(5-20) \cdot 10^3$	$(2-4) \cdot 10^5$	$(2-20) \cdot 10^5$
$f_{кр}$ , МГц	0,1—0,7	0,6—4,0	4,0—6,0	4,0—13,0

При расчете радиолиний средних широт рекомендуется применять усредненные действующие значения высот слоя  $F_2$  — дневные (числитель) и ночные (знаменатель).

Таблица 3.2

Время года	Зима	Равноденствие	Лето
$H_c$ , км	250/350	275/300	400/250

Наибольшую частоту, при которой радиоволны отражаются от ионизированного слоя при вертикальном падении на него, называют критической. Критическая частота  $f_{кр}$  и электронная концентрация слоя связаны уравнениями:

$$f_{кр} = \sqrt{80,8 N_{max}}; N_{max} = 0,0124 f_{кр}^2, \quad (3.1); (3.2)$$

где  $f_{кр}$  — критическая частота, Гц;  $N_{max}$  — максимальное число свободных электронов в одном кубическом метре.

Наибольшая частота отражается от слоя при угле излучения  $\Delta = 0$ . Ее значение определяется уравнением

$$f_{мм} = f_{кр} \sqrt{1 + R_3 / 2H_c}. \quad (3.3)$$

Без учета сферичности Земли и ионосферы (когда  $r \leq 500$  км) максимальная и критическая частоты с углом падения на отражающий слой  $\varphi$  (рис. 3.1) связаны законом секанса:

$$f_{max} = f_{кр} \sec \varphi. \quad (3.4)$$

В технических расчетах поправку на сферичность вычисляют приближенно, принимая запись закона секанса в виде

$$f_{max} = f_{кр} k_s \sec \varphi. \quad (3.5)$$

Значение  $k_s \sec \varphi$  определяется действующей высотой отражения, протяженностью трассы по кривым передачи рис. 3.2.

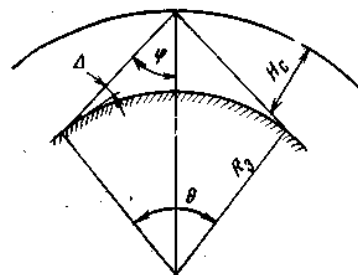


Рис. 3.1. Связь между углами: центральным  $\Theta$ ; возвышения  $\Delta$ ; падения на отражающий слой  $\varphi$

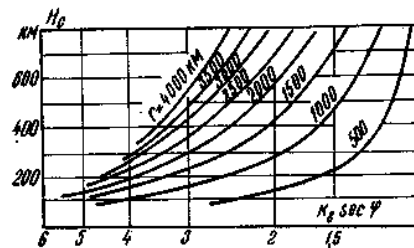


Рис. 3.2. Кривые передачи

Угол возвышения (излучения)  $\Delta$ , угол падения волны на отражающий слой  $\varphi$  (см. рис. 3.1) и действующее значение высоты отражающего слоя связаны соотношением

$$\sin \varphi = \cos \Delta / (1 + H_c / R_3). \quad (3.6)$$

Значения оптимальных углов излучения в зависимости от высоты отражающего слоя и протяженности трассы приведены на рис. 3.3.

Центральный угол дуги большого круга (см. рис. 3.1).

$$\Theta = 2(90^\circ - \Delta - \varphi). \quad (3.7)$$

Протяженность трассы и центральный угол связаны уравнением

$$r = 6370\Theta, \quad (3.8)$$

где  $r$  — расстояние, км;  $\Theta$  — центральный угол, рад.

При заданных рабочей частоте, критической частоте слоя и его действующей высоте существует критический угол падения волны на слой. Волны, падающие под углами меньше критического, проходят слой и не отражаются. Расстояние по земной поверхности, соответствующее приему волны, падающей на слой под критическим углом, определяет внешний радиус зоны молчания.

Критический угол падения  $\varphi_{кр}$  можно определить по закону секанса, заменив в нем максимальную частоту рабочей:

$$\cos \varphi_{кр} = f_{кр} / f_p. \quad (3.9)$$

В зоне молчания нет волн, отраженных от слоев, но могут быть обнаружены слабые поля, вызванные рассеянием на неоднородностях ионосферы.

Устойчивость радиосвязи при работе на ВЧ определяется выбором рабочих частот. Желательно работать на более высоких частотах, так как с увеличением частоты уменьшается поглощение.

в слоях *D* и *E*. Максимальная частота, отражающаяся от ионосферы при данном угле падения, т. е. для данной длины трассы, называется максимальной применимой частотой (МПЧ). Работа

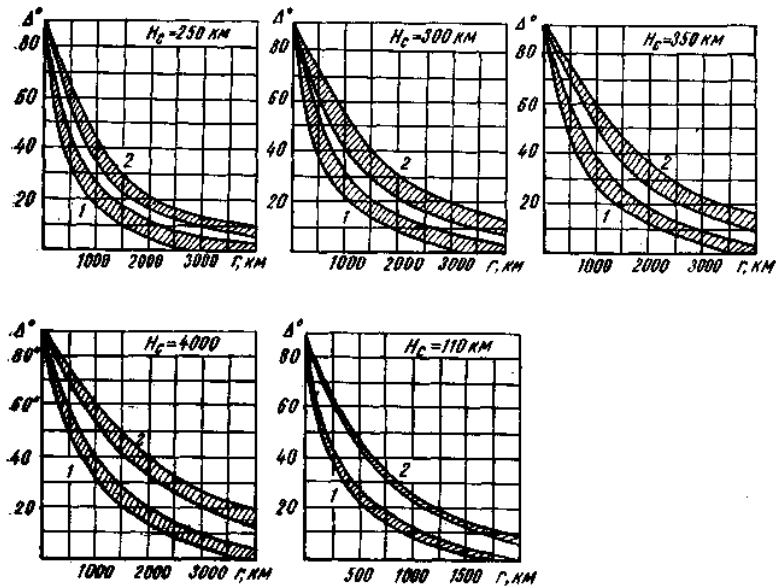


Рис. 3.3. Оптимальные углы излучения (возвышения):  
1 — с одним скачком; 2 — с двумя скачками

на МПЧ может оказаться неустойчивой из-за изменения параметров ионосферы во времени. Учитывая это, оптимальные рабочие частоты (ОРЧ) выбирают на 15% ниже МПЧ:

$$f_{орч} = 0,85 f_{мпч} \quad (3.10)$$

Определение МПЧ по прогнозам распространения радиоволн.

При определении МПЧ рекомендуется учитывать все слои ионосферы (*E*, *F*<sub>1</sub> и *F*<sub>2</sub>) и выбирать наибольшую из полученных. На трассах протяженностью до 2000 км наибольшая МПЧ часто определяется отражением от слоя *E*, на трассах 2000—3000 км — отражениями от слоя *F*<sub>1</sub> и на трассах большей протяженности — отражениями от слоя *F*<sub>2</sub>.

Для расчета МПЧ при отражении от слоя *F*<sub>2</sub> необходимо иметь карту мира (рис. 3.4), ионосферную карту прогноза МПЧ (рис. 3.5 и 3.6) и карту дуг большого круга (рис. 3.7), выполненные в одном масштабе. Ионосферные карты для слоя *F*<sub>2</sub> представляют собой контурные географические карты с нанесенными на них линиями равных значений МПЧ. Одна группа ионосферных карт содержит значения критических частот. Эти карты отмечены индексом *F*<sub>2</sub>-0—МПЧ (см. рис. 3.5). Вторая группа ионосферных карт содержит значения МПЧ для односкачковых трасс протяженностью 4000 км и обозначены индексом *F*<sub>2</sub>-4000—МПЧ (см. рис. 3.6). Для определения МПЧ при отражении

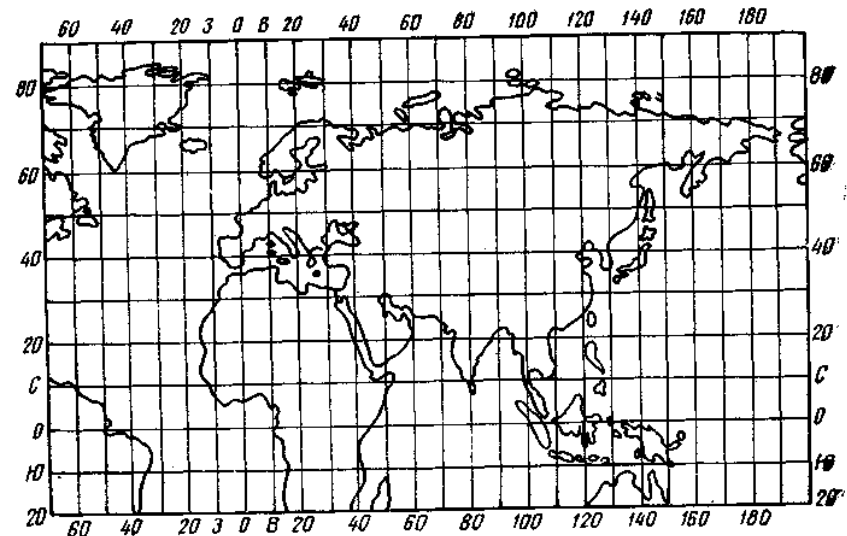


Рис. 3.4. Карта мира

Прогноз *F*<sub>2</sub>-0-МПЧ на январь в 4 московского декретного времени

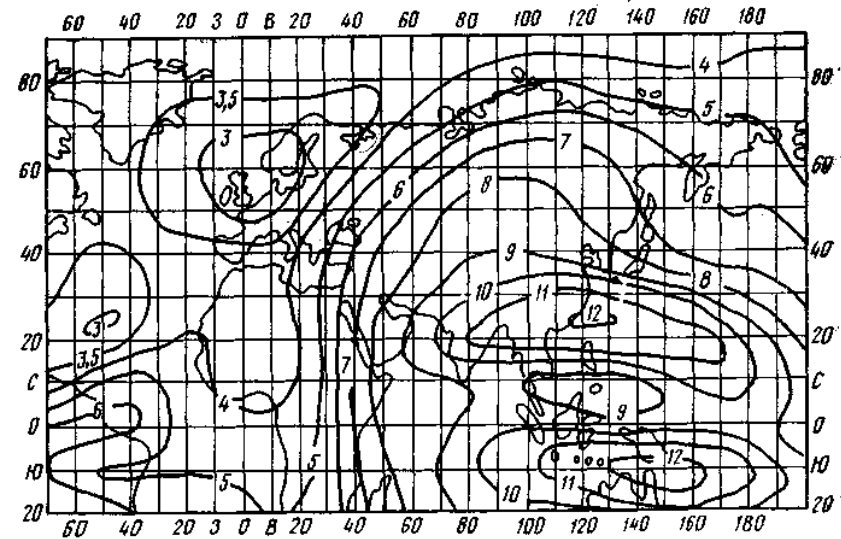


Рис. 3.5. Карта прогноза МПЧ

Прогноз  $F_2-4000$ -МПЧ на январь 8 ч московского декретного времени

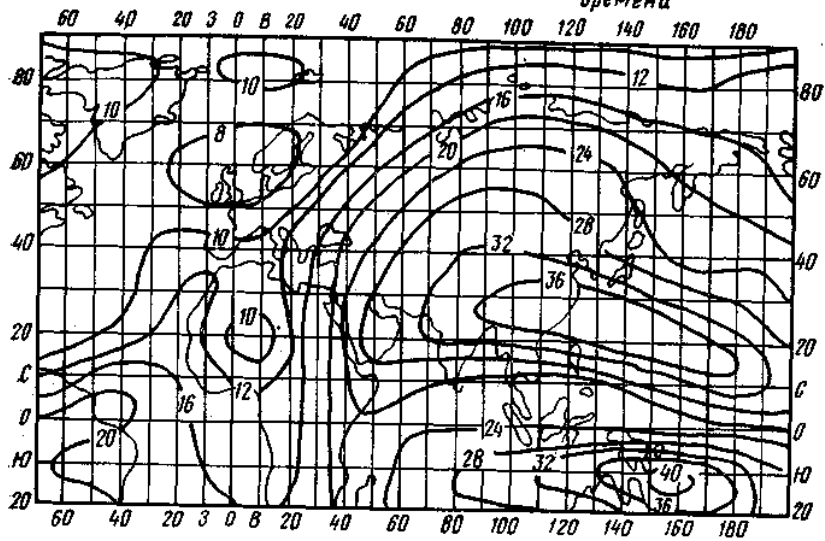


Рис. 3.6. Карта прогноза МПЧ

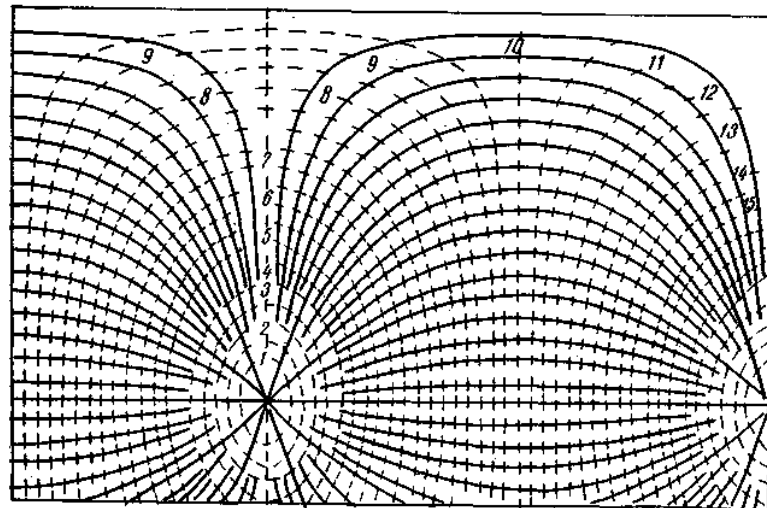


Рис. 3.7. Карта дуг большого круга

от слоя частоты  $F_2$  выбирают соответствующие заданному моменту времени и придерживаются следующей последовательности. На карту мира накладывают кальку и на нее наносят линию экватора, часть координатной сетки, точками отмечают пункты приема и передачи. Затем кальку накладывают на карту дуг большого круга, совмещают линии экваторов и, сдвигая кальку вправо или влево, добиваются положения, когда точки пунктов приема и передачи окажутся на одной дуге большого круга (сплошной линии) или на равных расстояниях по одну сторону от нее. Соединяют точки приема и передачи на кальке по дуге большого круга. Дуги большого круга пересекаются пунктирными линиями масштабной сетки. Расстояние между двумя соседними пунктирными линиями равно 500 км. Если протяженность трассы меньше 3500 км зимой и 4000 км летом считают, что распространение происходит одним скачком и точка отражения лежит на середине трассы по дуге большого круга. Трассы большей протяженности разбивают на несколько скачков и в середине каждого отмечают точки отражения. Кальку с нанесенной трассой и точкой отражения накладывают на ионосферную карту прогноза с индексом  $F_2-0$ -МПЧ, совмещают координатные сетки. По ближайшей к точке отражения линии одинаковых значений определяют МПЧ<sub>0</sub> (критическую частоту в точке отражения).

Аналогично по ионосферной карте прогноза с индексом  $F_2-4000$ -МПЧ определяют МПЧ<sub>4000</sub> (соответствующую трассе протяженностью 4000 км). Искомое значение МПЧ для конкретной трассы по ее протяженности находят по номограмме рис. 3.8.

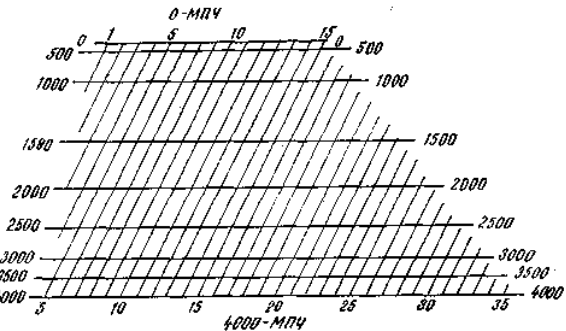


Рис. 3.8. Номограмма для определения МПЧ на трассах протяженностью 0—4000 км

Отсутствие долготного эффекта для слоев  $E$  и  $F_1$  позволяет определять МПЧ при отражении от слоев  $E$  и  $F_1$  по одной карте ионосферного прогноза, построенной для заданной области широт (рис. 3.9).

Напряженность поля КВ можно определить по формуле

$$E = (173/r) \sqrt{PG} e^{-\Gamma}, \quad (3.11)$$

где  $E$  — напряженность поля, мВ/м;  $P$  — мощность, подводимая к антенне, кВт;  $G$  — коэффициент усиления антенны относительно полуволнового вибратора;  $\Gamma$  — полный коэффициент поглощения в ионосфере.

В случае отражения от слоя  $F_2$  полный коэффициент поглощения

$$\Gamma = \frac{A_{\Sigma}}{(f_p + f_L)^2} + B_{F_2} f_p^2, \quad (3.12)$$

где  $A_{\Sigma}$  — коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $F_2$ , определяемый по графикам рис. 3.10;  $f_p$  — рабочая частота, МГц;  $f_L=0,8$  МГц — частота продольного гиромангнитного резонанса;  $B_{F_2}$  — отклоняющее поглощение в слое  $F_2$ , определяемое по графикам рис. 3.11.

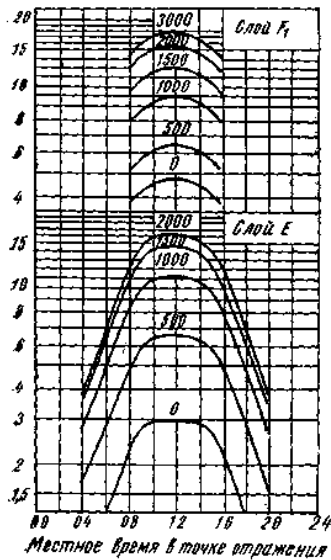


Рис. 3.9. Карта прогноза МПЧ слоев  $F_1$  и  $E$

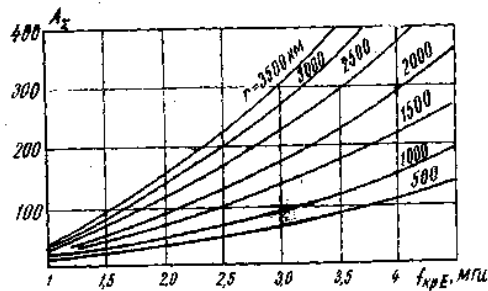


Рис. 3.10. Зависимость суммарного коэффициента неотклоняющего поглощения в слое  $F_2$  от критической частоты слоя  $E$

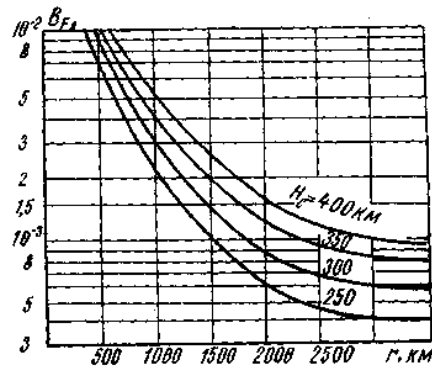


Рис. 3.11. Зависимость отклоняющего поглощения в слое  $F_2$  от длины линии

При отражении от слоя  $E$  коэффициент поглощения определяется по формуле

$$\Gamma = \frac{A_D}{(f_p + f_L)^2} + B_E f_p \sqrt{\frac{f_p}{f_p + f_L}} \quad (3.13)$$

где  $A_D$  — коэффициент неотклоняющего поглощения в слое  $D$ ;  $B_E$  — коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $E$ .

Местное время в точке отражения определяется разностью между долготой точки отражения и долготой меридиана Московского декретного времени ( $45^\circ$  В), если учесть, что изменение на  $15^\circ$  по долготе соответствует изменению на 1 ч по времени.

На трассах более 4000 км волны испытывают несколько отражений от ионосферы и поверхности Земли. Число отражений от ионосферы на трассе определяется округлением до ближайшего целого числа значения, полученного по формуле

$$n \approx r / (3500 - 4000), \quad (3.14)$$

где  $n$  — число отражений от ионосферы;  $r$  — протяженность трассы, км.

Напряженность поля коротких волн подвержена глубоким замираниям, вызванным многолучевостью. Для оценки такого поля пользуются медианными (средними) его значениями. За медианное принимают такое значение напряженности поля, при котором сумма отрезков времени, в течение которых фактическое значение поля превышает указанный уровень, равна сумме отрезков времени, в течение которых фактическое значение поля меньше этого

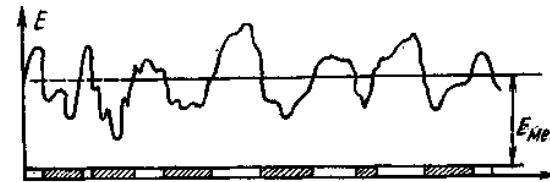


Рис. 3.12. К определению медианного уровня сигнала

уровня (рис. 3.12). Действующее медианное значение напряженности поля

$$E_{\text{мед}} = (173/r) \sqrt{PDF_{\text{мед}}}, \quad (3.15)$$

где  $E_{\text{мед}}$  — действующее медианное значение напряженности поля, мВ/м;  $r$  — длина трассы, км;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $D$  — коэффициент направленного действия антенны.

Медианное значение множителя ослабления

$$F_{\text{мед}} = 0,25(1+R)R^{n-1} e^{-\sum_{j=1}^n \Gamma_j}, \quad (3.16)$$

где  $R = (0,8 \div 1)$  — модуль коэффициента отражения от поверхности Земли;  $n$  — число отражений от ионосферы;  $\Gamma_j$  — коэффициент поглощения в  $j$ -й вершине.

Пример 3.1. Электронная концентрация слоя в точке отражения  $0,5 \cdot 10^6$  эл/см<sup>3</sup>, рабочая частота 8 МГц, действующая высота отражающего слоя 300 км. Определить: критическую частоту слоя, критический угол падения, угол излучения соответствующий критическому углу падения, внешний радиус зоны молчания.

Решение. Электронной концентрации  $0,5 \cdot 10^6$  эл/см<sup>3</sup> соответствует концентрация  $0,5 \cdot 10^{12}$  эл/м<sup>3</sup>.

Критическая частота

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,8 N_{\text{max}}} = \sqrt{80,8 \cdot 0,5 \cdot 10^{12}} = 6,35 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 6,35 \text{ МГц.}$$

Критический угол падения  $\varphi$  определим из уравнения (3.4):

$$f_{max} = f_{кр} \sec \varphi; \sec \varphi = f_{max} / f_{кр};$$

$$\cos \varphi = f_{кр} / f_{max} = 6,35 / 8 = 0,792; \varphi = 37^\circ 40'.$$

Угол излучения (возвышения), соответствующий критическому углу падения (3.6),

$$\cos \Delta = \sin \varphi (1 + H_c / R_s) = \sin 37^\circ 40' (1 + 300 / 6370) = 0,64; \Delta = 50^\circ 10'.$$

Центральный угол (3.7)

$$\Theta = 2(90^\circ - \Delta - \varphi) = 2(90^\circ - 37^\circ 40' - 50^\circ 10') = 4^\circ 20' = 4,12^\circ.$$

Внешний радиус зоны молчания

$$r = 111\Theta = 111 \cdot 4,12 = 456 \text{ км.}$$

Пример 3.2. Координаты пункта передачи  $40^\circ$  С широты  $50^\circ$  В долготы, пункта приема  $20^\circ$  С широты  $80^\circ$  В долготы. Определить МПЧ и ОРЧ для января 8 час. Московского декретного времени.

Решение. Определим МПЧ отражения от слоя  $F_2$ . Накладываем кальку на карту мира (см. рис. 3.4) и наносим на нее линию экватора, часть координатной сетки, пункты передачи и приема. Перенесем кальку на карту дуг большого круга (см. рис. 3.7), совместим линии экваторов и перемещением кальки вправо или влево вдоль линии экватора подберем такое положение, при котором точки, соответствующие передающей и приемной станциям, попали на одну и ту же дугу большого круга или заняли одинаковое промежуточное положение между двумя соседними дугами. Между точками передающей и приемной станций прочертим дугу большого круга и нанесем на нее штрихами масштабную сетку. Число масштабных отрезков в нашем случае 6, следовательно, протяженность трассы  $6 \times 500 = 3000$  км. На середине трассы отметим точку отражения. Ее координаты  $30^\circ$  С широты и  $70^\circ$  В долготы. Переносим кальку на карту прогноза критических частот слоя  $F_2$  с индексом  $F_2 - O$  — МПЧ на январь 8 час. Московского декретного времени (см. рис. 3.5), совмещаем координатные сетки и по ближайшей к точке отражения линии одинаковых значений определяем МПЧ<sub>0</sub> = 7 МГц (рис. 3.13б). Переносим кальку на

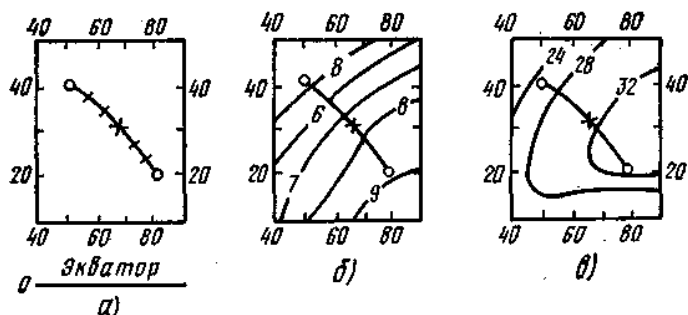


Рис. 3.13. Калька для определения МПЧ примера 3.2

карту прогноза с индексом  $F_2 - 4000$  — МПЧ на январь 8 час. Московского декретного времени (см. рис. 3.6), совмещаем координатные сетки и определяем для точки отражения МПЧ<sub>4000</sub>, равную 32 МГц (рис. 3.13в). На монограмме рис. 3.8 от шкалы 0 — МПЧ с отметкой 7 МГц проводим линию до отметки 32 МГц на шкале 4000 — МПЧ. Точка пересечения данной линии с горизонтальной линией расстояний 3000 км определит искомую МПЧ, равную 28 МГц, соответствующую отражению от слоя  $F_2$ .

Разность между долготой точки отражения и долготой меридиана Московского декретного времени  $70 - 45 = 25^\circ$ . Изменению долготы на  $25^\circ$  соответствует изменение времени  $25 : 15 = 1,66$  или 1,5 ч. В 8 час. Московского времени местное время в точке отражения будет 10 час.

По карте прогноза МПЧ на январь при отражении отслова  $F_1$  для трассы 3000 км и местного времени в точке отражения 10 час. находим  $F_1 - 3000$  — МПЧ, равную 16 МГц.

Для слоя  $E$  МПЧ отсутствует, следовательно, максимальная МПЧ на трассе равна 28 МГц.

Оптимальная рабочая частота (3.10)

$$f_{орч} = 0,85 f_{мпч} = 0,85 \cdot 28 = 23,8 \text{ МГц.}$$

Пример 3.3. Определить напряженность поля по условиям примера 3.2, если мощность, подводимая к антенне, 15 кВт, а коэффициент усиления антенны относительно полуволнового вибратора под оптимальным углом излучения для данной трассы 38,4.

Решение. Критическая частота слоя  $E$  в 10 час. местного времени в точке отражения найдем по карте прогноза рис. 3.9. Полагая  $r = 0$ , имеем  $f_{кр} = 3$  МГц.

Коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $F_2$  определим по кривой  $r = 3000$  км на рис. 3.10. Приняв для слоя  $E$   $f_{кр} = 3$  МГц, получим  $A_\Sigma = 275$ .

Примем высоту отражающего слоя  $H_c = 250$  км (см. табл. 3.2).

Коэффициент отклоняющего поглощения в слое  $F_2$  определим по рис. 3.11. Для  $H_c = 250$  км и  $r = 3000$  км  $B_{F_2} = 4 \cdot 10^{-4}$ .

Полный коэффициент поглощения (3.12)

$$\Gamma = \frac{A_\Sigma}{(f_p + f_L)^2} = B_{F_2} f_p^2 = \frac{275}{(20 + 0,8)^2} + 4 \cdot 10^{-4} \cdot 20^2 = 0,8.$$

Напряженность поля в точке приема (3.11)

$$E = \frac{173}{r} \sqrt{PG} e^{-\Gamma} = \frac{173}{3000} \sqrt{15 \cdot 38,4} \cdot 0,45 = 0,622 \text{ мВ/м};$$

$$\lg(e^{-0,8}) = -0,8 \lg e = -0,8 \cdot 4,343 = -0,347 = \bar{1},653;$$

$$e^{-0,8} = 0,45.$$

Задача 3.1. Известна электронная концентрация ионизированного слоя  $F_2$ . Определить критическую частоту слоя.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$N$ , эл/см <sup>3</sup>	$3,1 \cdot 10^5$	$4,45 \cdot 10^5$	$6,06 \cdot 10^5$	$7,92 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$10^6$

Задача 3.2. Известна критическая частота слоя  $F_1$ . Определить концентрацию свободных электронов в слое.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f_{кр}$ , МГц	4	4,3	4,7	5	5,5	6

Задача 3.3. Известна электронная концентрация ионизированного слоя  $E$ . Определить критическую частоту слоя.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$N$ , эл/м <sup>3</sup>	$5 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{11}$	$9 \cdot 10^{11}$	$10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{12}$



**Задача 3.4.** Известны: критическая частота, рабочая частота, действующая высота отражающего слоя. Определить: критический угол падения, угол излучения, соответствующий критическому углу падения, внешний радиус зоны молчания.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f_{кр}$ , МГц	5	6	7	8	10	11
$f_p$ , МГц	6,5	7	8	9,5	11	12,5
$H_c$ , км	300	400	350	400	300	400

**Задача 3.5.** Известны: протяженность трассы, действующая высота отражающего слоя. Определить оптимальные углы излучения при работе одним и двумя скачками.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	2000	1500	2500	1000	3000	3500
$H_c$ , км	250	300	350	240	400	400

**Задача 3.6.** Известны: протяженность трассы, действующая высота отражающего слоя. Определить: центральный угол, оптимальный угол излучения, угол падения волны на слой.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	1000	1500	2000	2500	1500	2000
$H_c$ , км	250	300	350	400	250	300

**Задача 3.7.** Известны: координаты пункта передачи (1), пункта приема (2). Определить МПЧ и ОРЧ для 8 ч Московского декретного времени по картам прогноза рис. 3.5 и 3.6.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Широта 1	80° С	60° С	50° С	50° С	80° С	40° С
Долгота 1	60° В	40° В	70° В	50° В	20° В	130° В
Широта 2	60° С	40° С	70° С	70° С	60° С	60° С
Долгота 2	80° В	60° В	40° В	20° В	50° В	100° В

**Задача 3.8.** Определить напряженность поля по условиям задачи 3.7, если дополнительно известны: мощность, подводимая к антенне; коэффициент усиления антенны относительно полуволнового вибратора под оптимальным углом для данной линии связи;  $H_c = 300$  км.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$P$ , кВт	15	20	50	15	20	50
$G$	26,6	45	50	60	31,2	18

**Задача 3.9.** По условиям задачи 3.7 определить критические частоты слоев  $F_1$  и  $F_2$  в точке отражения.

**Задача 3.10.** По условиям задачи 3.7 определить максимальные электронные концентрации слоев  $F_1$  и  $F_2$  в точке отражения.

**Задача 3.11.** По условиям задачи 3.7 определить оптимальные углы излучения, если известна действующая высота отражающего слоя.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$H_c$ , км	350	400	300	250	350	400

30

## ГЛАВА 4 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГЕКТОМЕТРОВЫХ ВОЛН

Гектометровыми (СЧ) называются волны от 100 до 1000 м (300—3000 кГц). В дневные часы гектометровые волны распространяются только как земные, поскольку пространственные волны поглощаются в слое  $D$ . Дальность распространения земной волны при распространении над сушей ограничивается расстоянием 500 км, а над морем — 1000 км.

В ночные часы слой  $D$  исчезает и волны, достигая слоя  $E$ , отражаются от него, как от области, в которой с высотой постепенно уменьшается диэлектрическая проницаемость. За счет пространственной волны дальность распространения увеличивается до нескольких тысяч километров.

Напряженность электрического поля земной волны

$$E_d = E_1 \sqrt{P}, \quad (4.1)$$

где  $E_d$  — действующее значение напряженности электрического поля, мкВ/м;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $E_1$  определяется по графикам МККР (Международного Консультативного Комитета по Радиосвязи), приведенным на рис. 4.1 и 4.2 и составленным для излучаемой мощности 1 кВт при работе на короткую по сравнению с длиной волны антенну с КНД=1,5.

Расчет напряженности поля в случае, когда часть трассы на расстоянии  $r_1$  проходит над поверхностью с параметрами почвы 1, а вторая часть протяженностью  $r_2$  — над почвой с параметрами 2 (рис. 4.3), производят в следующем порядке: по графикам МККР рис. 4.1 или 4.2 определяют  $E_1$  (1;  $r_1$ ) — для поч-

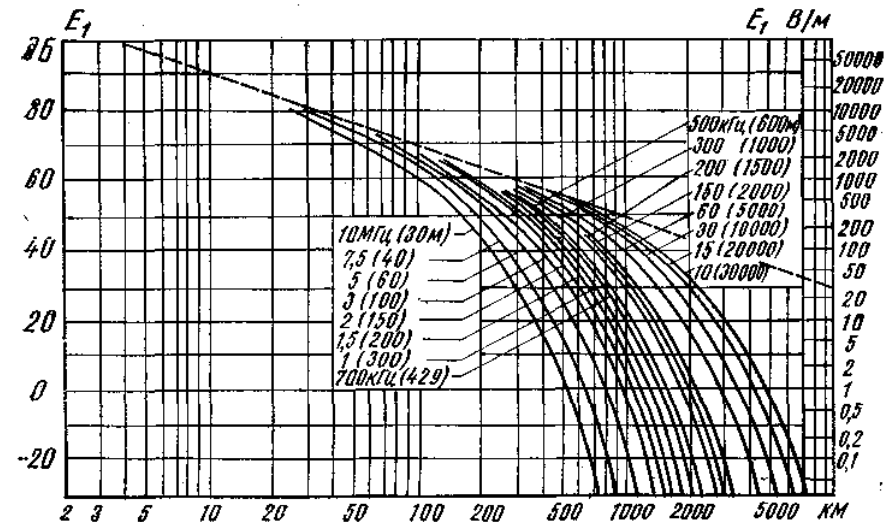


Рис. 4.1. График МККР для определения напряженности поля земной волны при распространении над морем ( $\epsilon' = 80$ ;  $\sigma = 4$  См/м;  $P = 1$  кВт;  $D = 1,5$ )

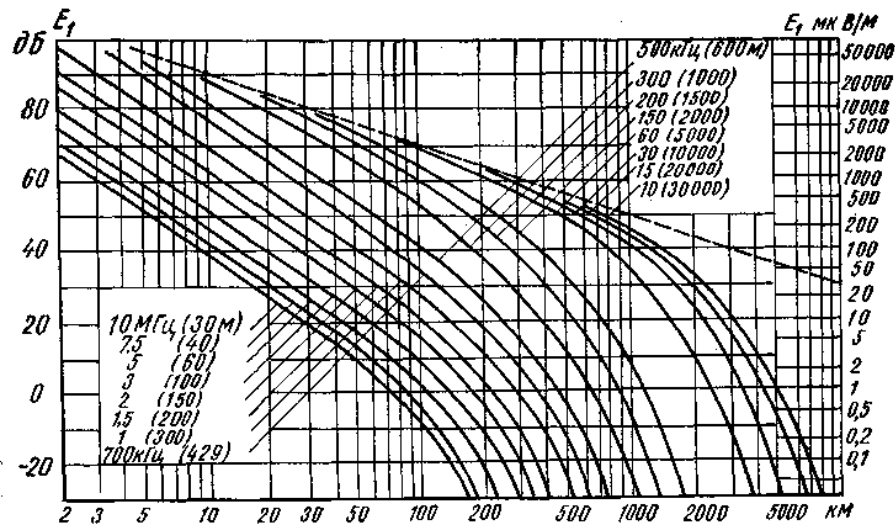


Рис. 4.2. График МККР для определения напряженности поля земной волны при распространении над сушей ( $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м;  $P = 1$  кВт;  $D = 1,5$ )

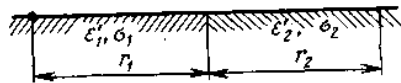


Рис. 4.3. Неоднородная трасса из двух участков

вы с параметрами 1 на расстоянии  $r_1$ ;  $E_1(2; r_1)$  — для почвы с параметрами 2 на расстоянии  $r_1$ ;  $E_1(2; r_1 + r_2)$  — для почвы 2 на расстоянии  $r_1 + r_2$  и рассчитывают параметр  $E_{1-3}$ :

$$E_{1-3} = \frac{E_1(1; r_1) E_1(2; r_1 + r_2)}{E_1(2; r_1)} \quad (4.2)$$

Аналогично определяют параметры  $E_1(2; r_2)$ ;  $E_1(1; r_2)$ ;  $E_1(1; r_1 + r_2)$  и рассчитывают  $E_{3-1}$ :

$$E_{3-1} = \frac{E_1(2; r_2) E_1(1; r_1 + r_2)}{E_1(1; r_2)} \quad (4.3)$$

Действующее значение напряженности поля, мкВ/м,

$$E_d = \sqrt{E_{1-3} E_{3-1}} \sqrt{P} \quad (4.4)$$

где  $P$  — мощность излучения, кВт.

Напряженность электрического поля в ночные часы

$$E_d = \frac{10233}{\sqrt{r}} \sqrt{PD} e^{-8,94 \cdot 10^{-4} r \lambda^{-0,26}} \quad (4.5)$$

где  $P$  — мощность излучения, кВт;  $r$  и  $\lambda$ , км;  $E_d$ , мкВ/м.

При распространении волн вдоль поверхности Земли, вследствие конечной проводимости почвы на границе раздела воздух — почва, кроме нормальной (перпендикулярной к поверхности почвы) возникает продольная составляющая. Продольная  $E_x$  и нор-

мальная  $E_z$  составляющие поля волны на поверхности раздела связаны соотношением.

$$E_x = E_z / \sqrt{(\epsilon')^2 + (60\lambda\sigma)^2} \quad (4.6)$$

Продольная составляющая поля на глубине  $h$

$$E_x = E_z e^{-\delta h} / \sqrt{(\epsilon')^2 + (60\lambda\sigma)^2} \quad (4.7)$$

где  $\delta$  — коэффициент поглощения, определяется в зависимости от свойств почвы по (1.8) или (1.11).

Пример 4.1. Определить напряженность электрического поля земной волны на расстоянии 100 км при распространении над сушей ( $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м), если известны: частота 200 кГц; мощность излучения 100 кВт; КНД 1,5.

Решение. По графикам МККР рис. 4.2 для  $r = 100$  км находим  $E_1 = 1000$  мкВ/м, или 60 дБ.

Действующее значение напряженности поля земной волны (4.1)

$$E_d = E_1 \sqrt{P} = 1000 \sqrt{100} = 10000 \text{ мкВ/м или } 80 \text{ дБ.}$$

Пример 4.2. Определить напряженность поля земной волны на расстоянии 200 км, если первая часть трассы на протяжении  $r_1 = 120$  км проходит над морем, а вторая протяженностью  $r_2 = 80$  км — над сушей. Мощность излучения 144 кВт, частоты 300 кГц, КНД = 1,5.

Решение. По графикам МККР рис. 4.1 и рис. 4.2 находим:

$$E_1(1; r_1) = 1780 \text{ мкВ/м, или } 65 \text{ дБ; } E_1(2; r_1) = 316 \text{ мкВ/м, или } 50 \text{ дБ;}$$

$$E_1(2; r_1 + r_2) = 79,5 \text{ мкВ/м, или } 38 \text{ дБ; } E_1(2; r_2) = 710 \text{ мкВ/м, или } 57 \text{ дБ;}$$

$$E_1(1; r_2) = 3160 \text{ мкВ/м, или } 70 \text{ дБ; } E_1(1; r_1 + r_2) = 1000 \text{ мкВ/м, или } 60 \text{ дБ.}$$

По (4.2) и (4.3) определяем параметры:

$$E_{1-3} = \frac{E_1(1; r_1) E_1(2; r_1 + r_2)}{E_1(2; r_1)} = \frac{1780 \cdot 79,5}{316} = 448 \text{ мкВ/м (65 дБ)}$$

$$E_{3-1} = \frac{E_1(2; r_2) E_1(1; r_1 + r_2)}{E_1(1; r_2)} = \frac{710 \cdot 1000}{3160} = 224 \text{ мкВ/м (35 дБ).}$$

Ожидаемое действующее значение напряженности поля

$$E_d = \sqrt{E_{1-3} E_{3-1}} \sqrt{P} = \sqrt{448 \cdot 224 \cdot 144} = 3800 \text{ мкВ/м (71,6 дБ).}$$

Приводим решение в логарифмической форме:

$$E_{1-3} = 65 + 38 - 50 = 53 \text{ дБ; } E_{3-1} = 57 + 60 - 70 = 47 \text{ дБ;}$$

$$\sqrt{P} = 10 \lg 144 = 21,6 \text{ дБ; } E_d = 0,5(53 + 47) + 21,6 = 71,6 \text{ дБ.}$$

Пример 4.3. Определить напряженность поля в ночные часы на расстоянии 1000 км при работе на волне 500 м. Мощность излучения 90 кВт; КНД антенны 1,5.

Решение. Расчет выполним по (4.5):

$$x = \lambda^{-0,26} = 0,5^{-0,26}; \lg x = -0,26 \lg 0,5 = -0,26 \cdot 1,7 = 0,078 = 1,922; x = 0,835;$$

$$8,94 \cdot 10^{-4} r \lambda^{-0,26} = 8,94 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 \cdot 0,835 = 0,746; e^{-0,746} = 0,474;$$

$$E_d = (10233 / \sqrt{r}) \sqrt{PD} e^{-8,94 \cdot 10^{-4} r \lambda^{-0,26}} = (10233 / \sqrt{1000}) \times \sqrt{90 \cdot 1,5 \cdot 0,474} = 1780 \text{ мкВ/м (65 дБ).}$$

**Пример 4.4.** Определить продольную составляющую электрического поля на глубине 2 м, если нормальная составляющая напряженности поля волны на границе раздела 20 мВ/м, частота 1 МГц, почва влажная с параметрами  $\epsilon' = 10$ ,  $\sigma = 0,01$  См/м.

**Решение.** Длина волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 10^6 = 300$  м;  $60\lambda\sigma = 60 \cdot 300 \cdot 0,01 = 180$ . В данном случае  $\epsilon' \ll 60\lambda\sigma$ , следовательно, коэффициент поглощения определяем по (1.11):

$$\delta = 2\pi \sqrt{30\sigma/\lambda} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{30 \cdot 0,01/300} = 0,2.$$

Продольная составляющая поля на глубине 2 м

$$E_x = \frac{E_z e^{-\delta h}}{\sqrt{(e')^2 + (60\lambda\delta)^2}} = \frac{20e^{-0,2 \cdot 2}}{\sqrt{10^2 + 180^2}} = 3,15 \text{ мВ/м.}$$

**Задача 4.1.** Определить напряженность электрического поля земной волны при распространении над сушей ( $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м), если известны: расстояние, частота, мощность излучения, КНД 1,5.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	110	180	18	100	180	60
$f$ , кГц	500	700	1100	1500	2000	3000
$P$ , кВт	90	250	4	125	90	130

**Задача 4.2.** Определить напряженность электрического поля земной волны при распространении над морем ( $\epsilon' = 80$ ,  $\sigma = 4$  См/м), если известны: расстояние, частота и мощность излучения,  $D = 1,5$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	1400	900	600	800	450	400
$f$ , кГц	500	700	1000	1500	2000	3000
$P$ , кВт	80	120	80	240	125	220

**Задача 4.3.** Определить напряженность электрического поля в ночные часы, если известны: расстояние, частота, мощность излучения, КНД антенны  $D = 1,5$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	1200	1400	1300	1200	1100	1000
$f$ , кГц	500	600	700	850	900	1000
$P$ , кВт	180	180	240	200	130	180

**Задача 4.4.** Определить продольную составляющую поля на границе раздела, если известны: частота, параметры почвы, нормальная составляющая напряженности поля.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	100	200	500	600	750	1000
$\epsilon'$	80	10	4	80	10	4
$\sigma$ , См/м	4	0,01	0,001	4	0,01	0,001
$E_z$ , мВ/В	20	5	10	10	5	20

## ГЛАВА 5

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ КИЛОМЕТРОВЫХ И МИРИАМЕТРОВЫХ ВОЛН

Волны от 1000 до 10 000 м относятся к километровым (НЧ), а от 10 до 100 км — к мириаметровым (ОНЧ). Напряженность поля этих волн рассчитывается по (4.1).

На расстояниях от 2000—3000 до 16 000—18 000 км расчет напряженности поля производят также по формулам Остина:

$$E_d = \frac{300 \sqrt{PD}}{r} \sqrt{\frac{\Theta}{\sin \Theta}} e^{-0,0014r\lambda^{-0,6}}; \quad (5.1)$$

$$E_d = \frac{120 \pi L_d I_{a, \text{эфф}}}{\lambda r} \sqrt{\frac{\Theta}{\sin \Theta}} e^{-0,0014r\lambda^{-0,6}}; \quad (5.2)$$

где  $E_d$  — действующее значение напряженности поля, мВ/м;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $D$  — коэффициент направленного действия антенны;  $r$  — расстояние, км;  $\Theta$  — центральный угол;  $\lambda$  — длина волны, км;  $L_d$  — действующая длина (высота) антенны, км;  $I_{a, \text{эфф}}$  — эффективное значение тока антенны, А.

**Пример 5.1.** Определить напряженность поля поверхностной волны при распространении над сушей ( $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 10^{-3}$  См/м) на расстоянии 500 км при мощности излучения 150 кВт на частоте 60 кГц;  $D = 1,5$ .

**Решение.** По кривой рис. 4.2 для  $r = 500$  км и  $f = 60$  кГц находим  $E_1 = 50$  дБ, или  $E_1 = 316$  мкВ/м;

$$E_d = E_1 \sqrt{P} = 316 \sqrt{150} = 3870 \text{ мкВ/м}; \quad 20 \lg 3870 = 72 \text{ дБ.}$$

**Пример 5.2.** Определить напряженность поля на расстоянии 4000 км, если при работе на волне  $\lambda = 5$  км  $I_{a, \text{эфф}} = 100$  А;  $L_d = 130$  м.

**Решение.** Напряженность поля определим по ф-ле (5.2), предварительно вычислив значения некоторых сомножителей:

$$\Theta = r/R_3 = 4000/6370 = 0,63 \text{ рад, или } 36^\circ;$$

$$x = \lambda^{-0,6} = 5^{-0,6}; \quad \lg x = -0,6 \lg 5 = -0,6 \cdot 0,7 = -0,42 = \bar{1},58; \quad x = 0,38;$$

$$0,0014 \cdot 4000 \cdot 0,38 = 2,12; \quad e^{-2,12} = 0,12;$$

$$E_d = \frac{120 \pi L_d I_{a, \text{эфф}}}{\lambda r} \sqrt{\frac{\Theta}{\sin \Theta}} e^{-0,0014r\lambda^{-0,6}} = \frac{120 \cdot 3,14 \cdot 0,13 \cdot 100}{5 \cdot 4000} \sqrt{\frac{0,63}{\sin 36^\circ}} \times 0,12 = 0,3 \text{ мВ/м.}$$

**Задача 5.1.** Определить напряженность электрического поля земной волны при распространении над сушей ( $\epsilon' = 4$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м), если заданы: расстояние, мощность излучения и длина волны,  $D = 1,5$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	300	500	350	1000	800	650
$P$ , кВт	70	55	250	150	120	100
$\lambda$ , м	10 000	5000	2000	10 000	5000	2000

**Задача 5.2.** Определить напряженность поля в ночные часы, если известны: расстояние, длина волны и мощность излучения,  $D=1,5$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	4000	3000	5000	10000	7000	6000
$\lambda$ , м	4000	4550	5000	7000	9000	8000
$P$ , кВт	200	200	150	300	150	180

**Задача 5.3** Определить напряженность поля, если известны: расстояние, частота, ток в антенне и ее действующая длина.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r$ , км	3000	3500	4000	3000	3000	3500
$f$ , кГц	66	60	60	70	70	75
$I_{a.эфф}$ , А	400	250	300	100	200	200
$L_d$ , м	150	160	180	150	160	180

## ГЛАВА 6

### ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН



Реальные антенны излучают в окружающее пространство в различных направлениях неодинаково. Зависимость напряженности поля, излучаемого антенной, измеренная на достаточно большом, но одинаковом расстоянии от антенны от углов наблюдения  $\Delta$  и  $\varphi$ , называется характеристикой направленности. Графическое представление этой характеристики называют диаграммой направленности. Диаграммы направленности строят нормированными, для которых максимальное значение  $F(\Delta; \varphi)_{max} = 1$ .

Коэффициентом защитного действия  $k_{заш}$  антенны называют отношение квадрата напряженности поля, созданного антенной в главном направлении, к квадрату напряженности поля в направлении, противоположном главному:

$$k_{заш} = E^2_{0^\circ} / E^2_{180^\circ} = F^2(0^\circ) / F^2(180^\circ), \quad (6.1)$$

в относительных единицах или в децибелах

$$k_{заш} = 20 \lg [F(0^\circ) / F(180^\circ)]. \quad (6.2)$$

На основании принципа взаимности параметры антенн в режиме приема и передачи имеют одинаковые значения.

Коэффициентом направленного действия (КНД)  $D$  в данном направлении называют отношение квадрата напряженности поля, созданного антенной в данном (обычно главном) направлении, к среднему (по всем направлениям) значению квадрата напряженности поля. Коэффициент направленного действия показывает, во сколько раз необходимо увеличить мощность излучения при

замене направленной антенны ненаправленной для сохранения прежней напряженности поля в точке приема.

Эффективной или действующей площадью  $S_{эфф}$  приемной антенны называют эквивалентную площадь, с которой полностью поглощается энергия волны, отдаваемая в согласованную нагрузку.

Эффективная площадь антенны связана с ее физической площадью раскрыва  $S$  коэффициентом использования поверхности раскрыва (КИП)  $\nu$ :

$$\nu = S_{эфф} / S. \quad (6.3)$$

Если в раскрыве антенны поле синфазно и имеет равные амплитуды, то  $\nu = 1$ . Для антенн с прямоугольным раскрывом, когда амплитуды поля вдоль одной из сторон раскрыва постоянны, а вдоль другой — изменяются по закону  $E_x = E_0 \sin(\pi x / L)$ ,  $\nu = 0,8$ . При наличии фазовых искажений в раскрыве КИП уменьшается.

Действующей длиной приемной антенны называют коэффициент пропорциональности между максимальной ЭДС, наведенной в антенне  $\mathcal{E}_a$ , и напряженностью поля в точке приема  $E$ :

$$\mathcal{E}_a = L_d E. \quad (6.4)$$

Сопротивлением излучения антенны  $R_\Sigma$  называют коэффициент пропорциональности, связывающий мощность излучения с квадратом тока в антенне:

$$R_\Sigma = P_\Sigma / I_{a.эфф}^2. \quad (6.5)$$

Величина тока вдоль реальных антенн изменяется, поэтому сопротивление излучения относят либо к току на входе антенны  $R_{\Sigma a}$ , либо к току в пучности  $R_{\Sigma n}$ . Между собой эти сопротивления связаны уравнением

$$R_{\Sigma a} = R_{\Sigma n} / \sin^2 k_a l, \quad (6.6)$$

где  $k_a$  — волновое число для антенны;  $l$  — длина плеча антенны.

Коэффициентом полезного действия передающей антенны  $\eta_a$  называют отношение излучаемой мощности  $P_\Sigma$  к подводимой  $P_a$ .

Коэффициентом усиления передающей антенны  $G$  называют отношение квадрата напряженности поля, созданного антенной в данном (обычно главном) направлении, к квадрату напряженности поля, созданного эталонной антенной при равенстве подводимых мощностей. Коэффициент усиления (КУ) показывает, во сколько раз необходимо увеличить мощность, подводимую к эталонной антенне, по сравнению с мощностью, подводимой к данной антенне для сохранения прежней напряженности поля в точке приема.

Волновым сопротивлением антенны  $W$ , как и длинной линии, называют отношение напряжения к току бегущей (падающей) волны.

Шумовая температура антенны без потерь  $T_a^\circ$  — это температура, до которой следовало бы нагреть сопротивление, равное активной составляющей нагрузки антенны, чтобы на нем выделилась мощность шумов, равная мощности шумов внешних источников.

Параметры антенн между собой связаны соотношениями:

$$D = 120F^2(\Delta; \varphi)_{\max}/R_{\Sigma}; \quad (6.7)$$

здесь  $F(\Delta; \varphi)_{\max}$  — максимальное значение ненормированной характеристики направленности;

$$D = 4\pi S_{\text{эфф}}/\lambda^2; \quad D_{[\text{дБ}]} = 10 \lg D; \quad (6.8); (6.9)$$

$$S_{\text{эфф}} = D\lambda^2/4\pi; \quad S_{\text{эфф}} = 30\pi L_{\text{д}}^2/R_{\Sigma}; \quad (6.10); (6.11)$$

$$L_{\text{д}} = (\lambda/\pi) \sqrt{R_{\Sigma}D/120}; \quad L_{\text{д}} = \sqrt{S_{\text{эфф}}R_{\Sigma}/30\pi}; \quad (6.12); (6.13)$$

$$\eta_a = R_{\Sigma}/(R + R_{\text{п}}). \quad (6.14)$$

Коэффициент усиления антенн в различных частотных диапазонах определяют относительно различных эталонных антенн. В диапазонах гектометровых и километровых волн коэффициент усиления определяют относительно короткой по сравнению с длиной волны несимметричной антенной, расположенной непосредственно над идеально проводящей землей, для которой  $D_0 = 1,5$ . В этом случае

$$G = D\eta_a/1,5. \quad (6.15)$$

В диапазонах метровых и дециметровых волн КУ определяют относительно симметричного полуволнового вибратора:

$$G = D\eta_a/1,64. \quad (6.16)$$

В диапазоне СВЧ коэффициент усиления определяют относительно ненаправленного излучателя:

$$G = D\eta_a. \quad (6.17)$$

Коэффициент усиления часто выражают в децибеллах:

$$G = 10 \lg G. \quad (6.18)$$

Волновое сопротивление линии и антенны, Ом,

$$W = \sqrt{L_1/C_1}, \quad (6.19)$$

где  $L_1$  и  $C_1$  — соответственно погонные индуктивность, Г/м, и емкость, Ф/м;

$$W = 3333/C'_1. \quad (6.20)$$

Здесь  $C'_1$  — погонная емкость, пФ/м ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Шумовая температура антенны с учетом КПД фидера и антенны

$$T_a = [T_a^0 \eta_a + T(1 + \eta_a)] \eta_{\text{ф}} + T(1 - \eta_{\text{ф}}). \quad (6.21)$$

Здесь  $T$  — температура среды, окружающей антенну и фидер, К;  $T_a^0$  — шумовая температура антенны без потерь, К.

Приближенно КНД можно определить по ширине диаграммы направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$D \approx 33\,000/\varphi^{0,5} \Delta^{0,5}, \quad (6.22)$$

где  $\varphi^{0,5}$  и  $\Delta^{0,5}$  — ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности (0,707 по полю) соответственно в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, выраженная в градусах.

Пример 6.1. Антенна СГ(1/4)Р имеет сопротивление излучения 515 Ом, ненормированное значение множителя характеристики направленности 13,5. Определить КНД антенны.

Решение. Используя (6.7), имеем  $D = 120F^2(\Delta; \varphi)_{\max}/R_{\Sigma} = 120 \cdot 13,5^2/515 = 42,5$ .

Пример 6.2. Антенна СГД(4/4)РА на частоте 11,5 МГц имеет эффективную площадь 890 м<sup>2</sup>. Определить КНД антенны.

Решение. Длина волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/11,5 \cdot 10^6 = 26 \text{ м}$ .

Коэффициент направленного действия (6.8)

$$D = 4\pi S/\lambda^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 890/26^2 = 165.$$

Пример 6.3. Симметричный волновой вибратор ( $l = 0,5\lambda$ ) имеет сопротивление излучения 200 Ом,  $D = 2,4$ . Определить действующую длину антенны при работе на волне 20 м.

Решение. Используя (6.12), имеем

$$L_{\text{д}} = (\lambda/\pi) \sqrt{R_{\Sigma}D/120} = (20/3,14) \sqrt{200 \cdot 2,4/120} = 12,7 \text{ м}.$$

Пример 6.4. Входное сопротивление антенны 20—i75 Ом, сопротивление потерь 3 Ом. Определить КПД антенны.

Решение. Используя (6.14), имеем

$$\eta_a = R_{\Sigma}/(R_{\Sigma} + R_{\text{п}}) = 20/(20 + 3) = 0,87.$$

Пример 6.5. Шумовая температура антенны без потерь 20 К,  $\eta_a = 0,95$ ,  $\eta_{\text{ф}} = 0,85$ . Определить шумовую температуру антенны с учетом потерь при температуре окружающей среды 27°С.

Решение. Температура окружающей среды по шкале Кельвина

$$T = 27 + 273 = 300 \text{ К}.$$

Шумовая температура антенны с учетом потерь (6.21)

$$T_a = [T_a^0 \eta_a + T(1 - \eta_a)] \eta_{\text{ф}} + T(1 - \eta_{\text{ф}}) = \\ = [20 \cdot 0,95 + 300(1 - 0,95)] 0,85 + 300(1 - 0,85) = 74 \text{ К}.$$

Пример 6.6. Двухпроводная линия имеет погонную индуктивность 16,66 нГ/м и погонную емкость 6,66 пФ/м. Определить волновое сопротивление линии.

Решение. Используя (6.19), имеем

$$W = \sqrt{L_1/C_1} = \sqrt{16,66 \cdot 10^{-9}/6,66 \cdot 10^{-12}} = 500 \text{ Ом}.$$

Пример 6.7. Погонная емкость антенны 7,4 пФ/м. Определить волновое сопротивление антенны.

Решение. Используя (6.20), имеем  $W = 3333/C'_1 = 3333/7,4 = 450 \text{ Ом}$ .

Задача 6.1. Из трех параметров антенны: сопротивление излучения  $R_{\Sigma}$ , значение множителя ненормированной характеристики направленности  $F(\varphi)$  и КНД — известны два. Определить третий параметр.

Вариант	а	б	в	г	д
Тип антенны	СГ(2/2)Г	СГ(2/4)Р	СГ(2/8)Р	СГ(4/4)Р	СГ(4/8)Р
$R_{\Sigma}$ , Ом	520	1120	X	2200	4360
$F(\varphi)_{max}$	12,3	23,5	47	X	X
$D$	X	X	116	156	310

Задача 6.2. Определить эффективную площадь антенны по заданной частоте и КНД.

Вариант	а	б	в	г	д
Тип антенны	СГД(2/4)РА	РГД(65/4)1	РПА	РПА	РПА
$f$ , МГц	16,66	13,636	3785	6000	8000
$D$ , дБ	18,46	20	40	43,54	45,55

Задача 6.3. Известны: эффективная площадь антенны, сопротивление излучения. Определить действующую длину антенны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$S_{эфф}$ , м <sup>2</sup>	900	1800	3600	900	7200	10 800
$R_{\Sigma}$ , Ом	514	1117	2300	518	4400	6700

Задача 6.4. Известны: входное сопротивление и сопротивление потерь, отнесенное ко входу антенны. Определить КПД антенны.

Вариант	а	б	в	г	д
$Z_a$ , Ом	12 — i 20	90 + i 40	43 — i 20	10 — i 90	75 + i 60
$R_{п}$ , Ом	2,5	5	5	11,1	6,5

Задача 6.5. Известны: шумовая температура антенны без потерь  $T_a^{\circ}$ ; КПД антенны и волновода (фидера); температура среды, окружающей антенну, и волновод  $T$ . Определить шумовую температуру антенны с учетом потерь.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$T_a^{\circ}$ , К	25	25	35	30	40	30
$\eta_a$	0,9	0,95	0,85	0,9	0,8	0,85
$\eta_{\phi}$	0,8	0,85	0,8	0,85	0,8	0,75
$T$ , °С	27	30	0	27	30	0

Задача 6.6. Антенна РПА имеет площадь раскрыва 7,5 м<sup>2</sup>, известны частота и эффективная площадь. Определить КИП и КНД антенны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , ГГц	4	5	6	7	8	10
$S_{эфф}$ , м <sup>2</sup>	5	4,75	4,5	4,25	4	3,7

Задача 6.7. Определить волновое сопротивление антенны по заданной величине погонной емкости.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$C'_1$ , Пф/м	15	12	10	7	5	44,5

## ГЛАВА 7

### СИММЕТРИЧНЫЙ И НЕСИММЕТРИЧНЫЙ ВИБРАТОРЫ

Распределение тока  $I_x$  и заряда  $Q_x$  вдоль симметричного и несимметричного вибраторов определяется уравнениями:

$$I_x = I_{\Pi} \sin k_a x; \quad Q_x = Q_{\Pi} \cos k_a x; \quad (7.1); (7.2)$$

$$k_a = \xi k; \quad k = 2\pi/\lambda. \quad (7.3); (7.4)$$

Здесь  $I_{\Pi}$  и  $Q_{\Pi}$  — величины тока и заряда в пучности;  $\xi = c/v_{\phi}$  — коэффициент укорочения волны в вибраторе;  $k$  — волновое число;  $x$  — расстояние от конца вибратора;  $c$  — скорость света;  $v_{\phi}$  — фазовая скорость в антенне.

Зависимость коэффициента укорочения от отношения длины плеча вибратора к его радиусу приведена на рис. 7.1.

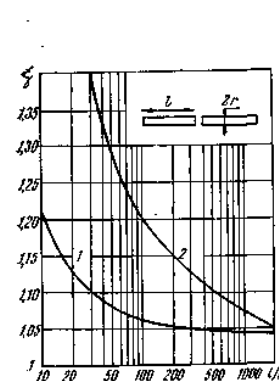


Рис. 7.1. Коэффициент укорочения волны для полуволнового (1) и волнового (2) вибраторов

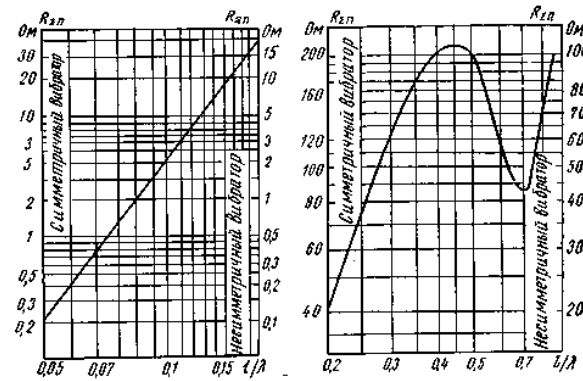


Рис. 7.2. Сопротивление излучения, отнесенное к току в пучности симметричного и несимметричного вибраторов

Ток на входе антенны

$$I_a = I_{\Pi} \sin k_a l. \quad (7.5)$$

Напряжение в пучности вибратора

$$U_{\Pi} = I_{\Pi} W. \quad (7.6)$$

Напряжение на входе вибратора (антенны)

$$U_a = U_{\Pi} \cos k_a l. \quad (7.7)$$

Характеристика направленности симметричного вибратора в меридиональной плоскости рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \frac{\cos(k l \sin \varphi) - \cos kl}{\cos \varphi}; \quad F(\varphi)_{max} = 1 - \cos kl, \quad (7.8); (7.9)$$

где  $\varphi$  — угол, отсчитываемый от нормали к оси вибратора.

Для полуволнового вибратора ( $2l=0,5\lambda$ )

$$F(\varphi) = \cos(0,5\pi \sin \varphi) / \cos \varphi. \quad (7.10)$$

Для волнового вибратора ( $2l=\lambda$ )

$$F(\varphi) = 2[\cos^2(0,5\pi \sin \varphi)] / \cos \varphi. \quad (7.11)$$

Характеристика направленности несимметричного вибратора, расположенного над идеально проводящей поверхностью и перпендикулярно ей рассчитывается по формуле

$$F(\Delta) = \frac{\cos(kl_B \sin \Delta) - \cos kl_B}{\cos \Delta}, \quad (7.12)$$

где  $\Delta$  — угол; отсчитываемый от проводящей поверхности;  $l_B$  — высота (длина) вибратора.

Действующая длина симметричного вибратора

$$L_d = (2/k) \operatorname{tg}(kl/2). \quad (7.13)$$

Действующая длина (высота) несимметричного вибратора высотой  $l_B$  с горизонтальной частью

$$L_d = \frac{2 \sin[k(l_{a,r} + 0,5 l_B)] \sin(0,5 kl_B)}{k \sin[k(l_B + l_{a,r})]}, \quad (7.14)$$

где  $l_{a,r}$  — эквивалентная длина горизонтальной части, определяется из уравнения

$$\operatorname{ctg} kl_{a,r} = -X_r/W_B. \quad (7.15)$$

Здесь  $X_r$  — реактивное сопротивление горизонтальной части;  $W_B$  — волновое сопротивление вертикальной части.

Действующая длина несимметричного вибратора, наклоненного под углом  $\theta$  к идеально проводящей поверхности,

$$L_d = (1/k) \operatorname{tg}(0,5kl) \sin \theta. \quad (7.16)$$

Зависимость сопротивления излучения, отнесенного к току в пучности, от отношения  $l/\lambda$  тонких симметричного и несимметричного вибраторов приведена на рис. 7.2 и в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Сопротивление излучения, отнесенное к току в пучности симметричного и несимметричного вибраторов

$l/\lambda$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,65
Симметричный										
$R_{\Sigma n}$ , Ом	0,2	3,1	13	36	73,1	120	200	200	121	93
Несимметричный										
$R_{\Sigma n}$ , Ом	0,1	1,55	6,5	18	36,5	60	100	100	60,5	46,5

Сопротивление излучения несимметричного относительно короткого вибратора, отнесенное к току на входе,

$$R_{\Sigma a} = 1600(L_d/\lambda)^2. \quad (7.17)$$

Волновое сопротивление симметричного вибратора:

$$W = 276 \lg(l/r) - 120 \text{ Ом при } l \leq 0,5\lambda; \quad (7.18)$$

$$W = 276 \lg(\lambda/\pi r) - 68 \text{ Ом при } l \geq 0,5\lambda. \quad (7.19)$$

Волновое сопротивление несимметричных вибраторов:

$$W = 138 \lg(l/r) - 60 \text{ Ом при } l \leq 0,5; \quad (7.20)$$

$$W = 138 \lg(\lambda/\pi r) - 34 \text{ Ом при } l \geq 0,5. \quad (7.21)$$

Входное сопротивление симметричного и несимметричного вибраторов определяется по общей формуле

$$Z_a = \frac{R_{\Sigma n}}{(R_{\Sigma n}/W)^2 + \sin^2 k_a l} - i \frac{0,5 W \sin 2 k_a l}{(R_{\Sigma n}/W)^2 + \sin^2 k_a l}. \quad (7.22)$$

Для случаев  $0 < l/\lambda < 0,4$  и  $0,55 < l/\lambda < 0,7$  входное сопротивление относительно тонких вибраторов можно определять по упрощенной формуле

$$Z_a = R_{\Sigma n} / \sin^2 k_a l - i W \operatorname{ctg} k_a l. \quad (7.23)$$

Вблизи параллельного резонанса, когда  $l \approx 0,5\lambda$ ,

$$R_a = W^2 / R_{\Sigma n}. \quad (7.24)$$

Полоса пропускания полуволнового вибратора

$$2\Delta f = 292 f_0 / \pi W, \quad (7.25)$$

где  $f_0$  — резонансная частота.

Относительное укорочение полуволновых вибраторов

$$\Delta l/l = 2X_B / \pi W, \quad (7.26)$$

где  $X_B$  — реактивная составляющая входного сопротивления.

Резонансная длина плеча полуволнового вибратора

$$l = 0,25\lambda/\xi. \quad (7.27)$$

Резонансная длина плеча волнового вибратора

$$l = 0,5\lambda/\xi. \quad (7.28)$$

Пример 7.1. Симметричный вибратор имеет длину плеча 10 м, диаметр 20 мм. Построить распределение тока и заряда (потенциала) по вибратору при работе на частоте 15,5 МГц.

Решение. Длина волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 15,5 \cdot 10^6 = 19,3$  м.

Отношение  $l/\lambda = 10/19,3 = 0,517$ , т. е. вибратор близок к волновому. По кривой рис. 7.1 для волнового вибратора с  $l/r = 1000$  находим коэффициент укорочения  $\xi = 1,07$ .

Электрическая длина вибратора

$$k_a l = \xi 2\pi l/\lambda = 1,07 \cdot 2 \cdot 180 \cdot 10/19,3 = 200^\circ.$$

Расстояние от конца вибратора до положения пучности тока  $x_n \lambda / 4\xi = 19,3/4 \cdot 1,07 = 4,5$  м.

Для построения  $I_x$  и  $Q_x$  будем задавать значения  $x$  от 0 до  $l$ , например, через  $x_n/3$  и для каждого значения  $x$  определим  $k_a x$ ,  $I_x \equiv \sin k_a x$  и  $Q_x \equiv \cos k_a x$ . Результаты расчета сведены в таблицу.

$x$ , м	0	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,0
$k_a x$ , град	0	30	60	90	120	150	180	200
$\sin k_a x$	0	0,5	0,87	1	0,87	0,5	0	-0,34
$\cos k_a x$	1	0,87	0,50	0	-0,5	-0,87	-1	-0,94



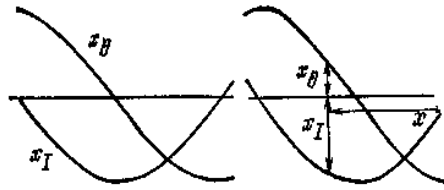


Рис. 7.3. Распределение тока и заряда по vibratorу примера 7.1

Распределение тока и заряда по vibratorу приведено на рис. 7.3, где  $l_{\text{п}}=10$  мм и  $Q_{\text{п}}=10$  мм. При построении распределения тока  $I_x$  берется с одинаковыми знаками в обоих плечах, а заряда  $Q_x$  — с противоположными.

Пример 7.2. Определить основные параметры симметричного vibratorа с длиной плеча 2 м, диаметром 80 мм на частоте 40 МГц.

Решение. Длина волны  $\lambda=c/f=3 \cdot 10^8/40 \cdot 10^6=7,5$  м;  $l/\lambda=2/7,5=0,266$ . Vibrator близок к полуволновому.

Для  $l/r=2000/40=50$  по кривой рис. 7.1 находим  $\xi=1,075$ . Электрическая длина vibratorа  $k_{\text{эл}}l=\xi 2\pi l/\lambda=1,075 \cdot 2 \cdot 180 \cdot 2/7,5=103^\circ$ .

Используя (7.23), (6.7), (6.16) и (6.10), имеем  $W=276 \lg(l/r)-120=276 \lg(2000/40)-120=350$  Ом.

Для  $l/\lambda=0,266$  по рис. 7.2 находим  $R_{\Sigma \text{п}}=87$  Ом;  
 $Z_{\text{в}}=R_{\Sigma \text{п}}/\sin^2 k_{\text{эл}}l-iW \operatorname{ctg} k_{\text{эл}}l=87/\sin^2 103^\circ-i350 \operatorname{ctg} 103^\circ=$   
 $=89+i80$  Ом;  $D=120 \int^2(\varphi)_{\text{max}}/R_{\Sigma \text{п}}=120(1-\cos 96)^\circ/87=1,68$ ;  
 $G=D\eta_{\text{а}}/1,64=1,68 \cdot 1/1,64=1,02$ ;  $S_{\text{эф}}=D\lambda^2/4\pi=1,68 \cdot 7,5^2/4 \cdot 3,14=$   
 $=7,5$  м<sup>2</sup>.

Пример 7.3. Определить размеры симметричного полуволнового vibratorа для работы на частоте 50 МГц с полосой 10 МГц.

Решение. Длина волны  $\lambda=c/f=3 \cdot 10^8/50 \cdot 10^6=6$  м.

Решая (7.25) относительно  $W$ , имеем

$$W=292f/\pi 2\Delta f=292 \cdot 50/3,14 \cdot 10=465 \text{ Ом.}$$

Решая (7.18) относительно  $l/r$  и используя (7.26), имеем

$$\lg(l/r)=\frac{W+120}{276}=\frac{465+120}{276}=2,22; l/r=166;$$

$$\Delta l/l=85/\pi W=85/3,14 \cdot 465=0,059; \Delta l=0,059(0,25\lambda)=$$

$$=0,059 \cdot 0,25 \cdot 6000=88 \text{ мм;}$$

$$l=0,25\lambda-\Delta l=0,25 \cdot 6000-88=1412 \text{ мм; } r=l:(l/r)=1412:166=$$

$$=8,5 \text{ мм, примем } 2r=18 \text{ мм.}$$

Пример 7.4. Определить входное сопротивление и КПД несимметричного vibratorа высотой 100 м, диаметром 3 м при работе на волне 300 м. Сопротивление потерь, отнесенное ко входу vibratorа, 5 Ом.

Решение. Для  $l/\lambda=100/300=0,333$  по кривой рис. 7.2 находим  $R_{\Sigma \text{п}}=75$  Ом. Для  $l/r=100/1,5=66,6$  по рис. 7.1 находим коэффициент укорочения  $\xi=1,085$ .

Электрическая длина vibratorа и его волновое сопротивление:

$$k_{\text{эл}}l=\xi 2\pi l/\lambda=1,085 \cdot 2 \cdot 180 \cdot 100/300=130^\circ;$$

$$W=138 \lg(l/r)-60=138 \lg(100/1,5)-60=109 \text{ Ом.}$$

Входное сопротивление vibratorа без учета потерь (7.22)

$$Z_{\text{в}}=R_{\Sigma \text{п}}/\sin^2 k_{\text{эл}}l-iW \operatorname{ctg} k_{\text{эл}}l=75/\sin^2 130^\circ-i190 \operatorname{ctg} 130^\circ=$$
  
 $=127+i160 \text{ Ом;}$

с учетом потерь  $Z_{\text{в}}=127+5+i160=132+i160$  Ом;  $\eta_{\text{а}}=$   
 $=R_{\Sigma \text{а}}/(R_{\Sigma \text{а}}+R_{\text{п}})=127/(127+5)=0,96.$

Задача 7.1. Определить волновое сопротивление и сопротивление излучения, если известны: частота, длина плеча и диаметр симметричного vibratorа.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	140	69,8	5,45	43,5	21,4	100
$l$ , м	0,5	1,16	16,5	3,8	8,4	0,8
$2r$ , мм	20	8,3	33	28	6	10

Задача 7.2. Определить волновое сопротивление и сопротивление излучения, если известны: частота, длина и диаметр несимметричного vibratorа.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , кГц	140	1500	600	500	1000	600
$l$ , м	250	70	120	180	150	180
$2r$ , м	2	2	2	2	2	2

Задача 7.3. Определить входное сопротивление, если известны: длина волны, длина плеча и радиус симметричного vibratorа.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , м	2,14	4,3	55	1,2	1,3	5
$l$ , м	0,5	1,16	16,5	0,5	0,5	1,5
$r$ , мм	10	4,15	1,5	5	10	8

Задача 7.4. Определить сопротивление излучения, входное сопротивление и КПД, если известны: длина волны; сопротивление потерь, отнесенное к току на входе; высота и радиус несимметричного vibratorа.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , м	2140	200	500	600	10	1000
$R_{\text{п.а}}$ , Ом	0,65	12	4	7	3	3,5
$l$ , м	250	70	120	180	2	200
$r$ , м	1	1	1	1	0,002	1

Задача 7.5. Определить КНД симметричного vibratorа, если известны длина плеча и длина волны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , м	2,14	4,3	55	1,2	1,3	20
$l$ , м	0,5	1,16	16,5	0,5	0,5	7

Задача 7.6. Определить действующую длину вертикального несимметричного vibratorа, если известны его высота и длина волны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$l, \text{ м}$	20	150	100	100	60	150
$\lambda, \text{ м}$	1000	800	600	500	400	700

Задача 7.7. Определить погонную емкость вибратора, если известно его волновое сопротивление.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W, \text{ Ом}$	200	250	300	450	600	500

Задача 7.8. Определить коэффициент укорочения волны в полуволновом симметричном вибраторе по его волновому сопротивлению.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W, \text{ Ом}$	560	400	350	300	235	520

Задача 7.9. Определить коэффициент укорочения волны в симметричном волновом вибраторе по его волновому сопротивлению.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W, \text{ Ом}$	620	515	430	350	320	500

## ГЛАВА 8

### МНОВИВРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ

Характеристики направленности сложных многовибраторных антенн при горизонтальной поляризации в горизонтальной  $F(\varphi)$  и вертикальной  $F(\Delta)$  плоскостях определяются уравнениями:

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_c(\varphi) F_p(\varphi); \quad F(\Delta) = F_1(\Delta) F_c(\Delta) F_p(\Delta) F_s(\Delta), \quad (8.1); \quad (8.2)$$

где  $F_1(\varphi)$  и  $F_1(\Delta)$  — множители характеристики направленности одиночного вибратора, расположенного в свободном пространстве соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $F_c(\varphi)$ ;  $F_c(\Delta)$  — множители систем излучателей;  $F_p(\varphi)$ ;  $F_p(\Delta)$  — множители, учитывающие влияние рефлектора;  $F_s(\Delta)$  — множитель, учитывающий влияние земли;  $\varphi$ ;  $\Delta$  — углы, отсчитываемые от нормали к оси или плоскости расположения вибраторов соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Для системы из двух излучателей (вибраторов):

$$F_p(\varphi) = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\Phi_2 - kd_p \cos \varphi)}; \quad (8.3)$$

$$m = \left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \sqrt{\frac{R_1^2 + X_{12}^2}{R_2^2 + (X_2 + X_{2H})^2}}; \quad (8.4)$$

$$\Phi_2 = \pi + \arctg(X_{12}/R_{12}) - \arctg[(X_2 + X_{2H})/R_2], \quad (8.5)$$

где  $R_{12}$ ,  $X_{12}$  — активная и реактивная составляющие сопротивления связи, определяемые по графикам рис. 8.1, 8.2, 8.3 и 8.4 или табл. 8.1;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  — собственные сопротивления вибраторов;  $X_{2H}$  — реактивное сопротивление настройки рефлектора;  $d_p$  — расстояние между вибратором и рефлектором.

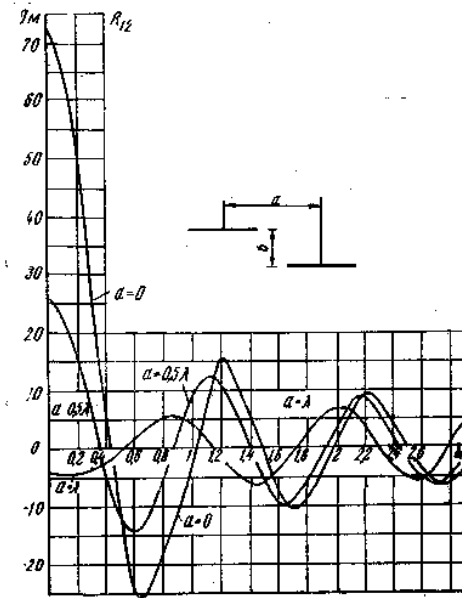


Рис. 8.1. Активная составляющая сопротивления связи между двумя полуволновыми вибраторами

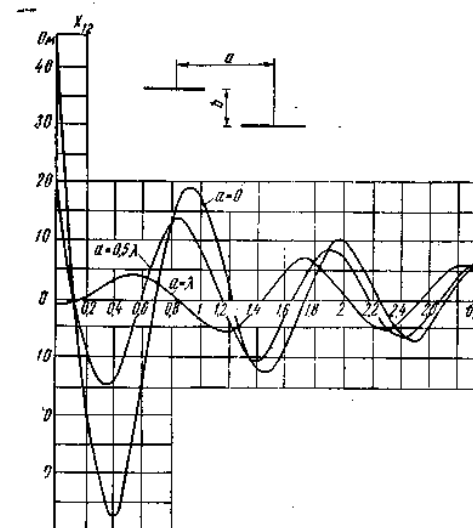


Рис. 8.2. Реактивная составляющая сопротивления связи между двумя полуволновыми вибраторами

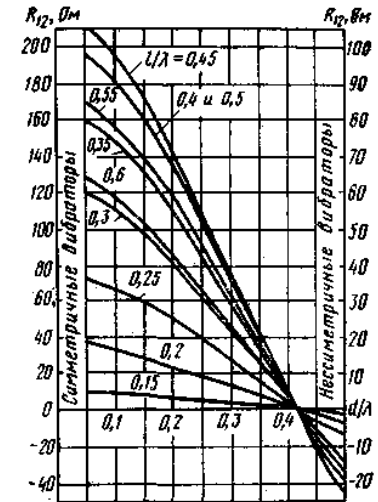


Рис. 8.3. Активная составляющая сопротивления связи, отнесенная к лучности тока между двумя параллельными вибраторами при отсутствии взаимного смещения в направлениях их осей

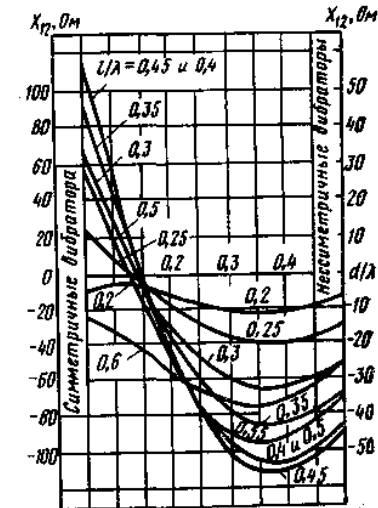


Рис. 8.4. Реактивная составляющая сопротивления связи, отнесенная к лучности тока между двумя параллельными вибраторами при отсутствии взаимного смещения в направлениях их осей

Таблица 8.1

Сопrotивления связи между двумя полуволновыми вибраторами

b/λ	a/λ=0		a/λ=0,5		a/λ=1		a/λ=1,5	
	R <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	R <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	R <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>
0	73,1	42,5	26,4	20,2	-4,1	-0,7	1,7	0,2
0,1	67,3	7,5	23,5	3,1	-4,1	-0,4	1,7	0,1
0,2	51,4	-19,2	15,7	-8,9	-4,0	0,5	1,7	-0,1
0,3	29,3	-34,4	5,2	-14,5	-3,5	1,8	1,6	-0,5
0,4	6,2	-37,5	-4,9	-13,7	-2,4	3,1	1,4	-0,9
0,5	-12,5	-29,9	-11,9	-7,9	-0,8	4,1	1,1	-1,4
0,6	-23,3	-15,9	-14,1	0,4	1,5	4,2	0,5	-1,8
0,7	-24,9	-0,2	-11,3	8,1	3,6	3,2	-0,4	-2,0
0,8	-18,5	12,2	-4,9	12,6	5,1	1,2	-1,3	-1,9
0,9	-7,5	18,5	2,8	12,8	5,3	-1,6	-2,1	-1,3
1,0	4,0	17,7	9,0	8,9	4,1	-4,2	-2,7	-0,3
1,1	12,4	11,3	12,0	2,4	1,5	-5,9	-2,8	1,0
1,2	15,2	1,9	10,8	-4,5	-1,6	-6,0	-2,2	2,2
1,3	12,6	-6,7	6,3	-9,3	-4,5	-4,5	-1,1	3,2
1,4	6,0	-11,9	-0,1	-10,8	-6,3	-1,6	0,4	3,5
1,5	-1,8	-12,3	-5,8	-10,8	-6,2	1,9	2,1	3,1
1,6	-8,1	-8,4	-9,2	-3,6	-4,3	4,8	3,4	1,8
1,7	-10,9	-2,0	-9,3	2,2	-1,2	6,4	4,0	0
1,8	-9,4	4,4	-6,1	6,7	2,4	6,0	3,6	-1,9
1,9	-4,8	8,7	-1,2	8,7	5,1	3,8	2,2	-3,5
2,0	1,1	9,4	3,9	7,5	6,3	0,4	-0,1	-4,2
2,1	6,1	6,7	7,2	3,8	5,4	-3,0	-1,9	-3,8
2,2	8,4	1,8	7,8	-1,0	2,9	-5,3	-3,6	-2,4
2,3	7,6	-3,3	5,6	-5,1	-0,5	-5,9	4,3	-0,2
2,4	4,0	-6,8	1,6	-7,1	-3,6	-4,6	-3,8	2,0
2,5	-0,7	-7,5	-2,7	-6,5	-5,4	-1,8	-2,2	3,7
2,6	-4,8	-5,5	-5,7	-3,7	-5,4	1,5	0	4,3
2,7	-6,9	-1,6	-6,6	0,3	-3,6	4,2	2,3	3,6
2,8	-6,3	2,6	-5,0	3,9	-0,7	5,4	3,8	1,9
2,9	-3,4	5,6	-1,8	5,9	2,4	4,7	4,1	-0,4
3,0	-0,3	6,4	1,9	5,7	4,5	2,5	3,3	-2,6

Полное сопротивление активного вибратора с учетом влияния рефлектора:

$$R_{1ce} = R_1 + m(R_{12} \cos \Phi_2 - X_{12} \sin \Phi_2). \quad (8.6)$$

$$X_{1ce} = X_1 + m(X_{12} \cos \Phi_2 + R_{12} \sin \Phi_2). \quad (8.7)$$

Для идеального аperiodического рефлектора:

$$F_p(\varphi) = 2 \sin(kd_p \cos \varphi); \quad F_p(\Delta) = 2 \sin(kd_p \cos \Delta). \quad (8.8); (8.9)$$

Множители систем излучателей:

$$F_c(\varphi) = \frac{\sin[0,5n(kd \sin \varphi - \Phi)]}{\sin[0,5(kd \sin \varphi - \Phi)]}; \quad F_c(\Delta) = \frac{\sin(0,5n_0(kd_0 \sin \Delta - \Phi))}{\sin[0,5(kd_0 \sin \Delta - \Phi)]} \quad (8.10); (8.11)$$

где  $d$  — расстояние между центрами соседних симметричных вибраторов в горизонтальной плоскости;  $n$  — число симметричных

вибраторов в горизонтальном ряду (этаже);  $d_0$  — расстояние между центрами вибраторов в вертикальной плоскости;  $n_0$  — число этажей;  $\Phi$  — сдвиг по фазе между токами соседних вибраторов.

При синфазном питании  $\Phi = 0$  и

$$F_c(\varphi) = \frac{\sin(0,5nkd \sin \varphi)}{\sin(0,5kd \sin \varphi)}; \quad F_c(\Delta) = \frac{\sin(0,5n_0kd_0 \sin \Delta)}{\sin(0,5kd_0 \sin \Delta)}. \quad (8.12); (8.13)$$

При  $n=2$   $F_c(\varphi) = 2 \cos(0,5kd \sin \varphi)$ . Для антенны бегущей волны

$$F_c(\Delta; \varphi) = \frac{\sin[0,5nkd(\xi - \cos \varphi \cos \Delta)]}{\sin[0,5kd(\xi - \cos \varphi \cos \Delta)]}. \quad (8.14)$$

В формуле (8.14) углы  $\varphi$  и  $\Delta$  отсчитываются от оси антенны,  $\xi = c/v_\varphi = \Phi/kd$  — коэффициент укорочения волны.

Направления нулевых излучений синфазной антенны определяются из уравнения

$$\sin \varphi_0 = M\lambda/nd, \quad \text{где } M = 1, 2, 3, \dots, \quad (8.15)$$

антенны бегущей волны — из уравнения

$$\cos \varphi_0 = \xi - M\lambda/nd, \quad \text{где } M = 1, 2, 3, \dots \quad (8.16)$$

Множитель, учитывающий влияние земли с идеальной проводимостью на характеристику направленности антенны при вертикальной поляризации,

$$F_{в.з}(\Delta) = 2 \cos(kH_{cp} \sin \Delta); \quad (8.17)$$

при горизонтальной поляризации

$$F_{г.з}(\Delta) = 2 \sin(kH_{cp} \sin \Delta), \quad (8.18)$$

где  $H_{cp}$  — средняя высота расположения вибраторов над землей.

При горизонтальной поляризации направления максимального излучения  $\Delta_m$  множителя земли определяются уравнением

$$\sin \Delta_m = M\lambda/4H_{cp}, \quad \text{где } M = 1, 3, 5, \dots, \quad (8.19)$$

направления нулевых излучений — уравнением

$$\sin \Delta_0 = M\lambda/2H_{cp}, \quad \text{где } M = 0, 1, 2, \dots \quad (8.20)$$

Оптимальная высота расположения горизонтальной антенны  $H = \lambda/4 \sin \Delta_m$ . (8.21)

Плоские аperiodические рефлекторы из параллельных проводов характеризуются коэффициентом прохождения  $\sigma$ , определяемым отношением квадрата напряженности поля волны, прошедшей через рефлектор  $E_{пр}$ , к квадрату напряженности поля падающей волны  $E_{пад}$ :

$$\sigma = E_{пр}^2/E_{пад}^2. \quad (8.22)$$

Для плоского рефлектора с расстоянием между центрами параллельных проводов  $d$  и радиусом проводов  $r$

$$\sigma = 1/\{1 + [\lambda/4,6d \lg(2\pi r/d)]^2\}. \quad (8.23)$$

Коэффициент прохождения для металлического листа с круглыми отверстиями

$$\sigma = (16rS'/3\lambda S)^2, \quad (8.24)$$

где  $r$  — радиус отверстий;  $S'$  — суммарная площадь отверстий;  $S$  — площадь листа рефлектора.

Расстояние между центрами отверстий в рефлекторе рекомендуется выбирать в пределах  $(0,5-1)\lambda$  при диаметре отверстий не более  $0,3\lambda$ .

Пример 8.1. Антенна состоит из двух вибраторов: активного вибратора (1) и рефлектора (2). Активный вибратор имеет полную длину 2360 мм, рефлектор — 2620 мм, расстояние между вибраторами 770 мм, диаметр вибраторов 16 мм. Определить входное сопротивление антенны и рассчитать ее характеристику направленности при работе на частоте 60 МГц без учета влияния земли.

Решение.  $l_1=2360/2=1180$  мм;  $l_2=1310$  мм;  $r_1=r_2=8$  мм;  $d_p=770$  мм;  $\lambda=5$  м.

Для  $l_1/\lambda=1,18/5=0,236$  и  $l_2/\lambda=1,31/5=0,262$  по кривым рис. 7.2 находим  $R_{\Sigma n1}=64$  Ом,  $R_{\Sigma n2}=85$  Ом.

Для  $l_1/r=1180/8=147$  из рис. 7.1 имеем  $\xi=1,06$ .

Волновое сопротивление вибраторов (7.18)

$$W=276 \lg l/r - 120 = 276 \lg 235 - 120 = 545 \text{ Ом.}$$

Электрические длины вибраторов:

$$ka_1 l_1 = 1,06 \cdot 360 \cdot 1,18/5 = 90^\circ; ka_2 l_2 = 1,06 \cdot 360 \cdot 1,31/5 = 100^\circ.$$

Собственные сопротивления вибраторов (7.23):

$$Z_1 = R_{\Sigma n1} / \sin^2 ka_1 l_1 - i W \operatorname{ctg} ka_1 l_1 = 64 / \sin^2 90^\circ - i 545 \operatorname{ctg} 90^\circ = 64 \text{ Ом;}$$

$$Z_2 = 85 / \sin^2 100^\circ - i 545 \operatorname{ctg} 100^\circ = 84 + i 96 \text{ Ом.}$$

При различных длинах вибраторов сопротивление связи определяют для вибраторов, средняя длина которых  $l_{cp}=1245$  мм.

Для  $l_{cp}/\lambda=1,245/5=0,25$  и  $d/\lambda=0,77/5=0,154$  по кривой рис. 8.3 и 8.4 находим  $R_{12}=60$  Ом;  $X_{12}=-7$  Ом;

$$m = \sqrt{\frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_2^2 + (X_2 + X_{2H})^2}} = \sqrt{\frac{60^2 + 7^2}{84^2 + (96 + 0)^2}} = 0,5;$$

$$\Phi_2 = \pi + \operatorname{arctg}(X_{12}/R_{12}) - \operatorname{arctg}[(X_2 + X_{2H})/R_2] = \\ = 180 + \operatorname{arctg}(-7/60) - \operatorname{arctg}[(96 + 0)/84] = 125^\circ.$$

Входное сопротивление антенны (активного вибратора)

$$R_{1 \infty} = R_1 + m(R_{12} \cos \Phi_2 - X_{12} \sin \Phi_2) = \\ = 64 + 0,5(60 \cos 125^\circ + 7 \sin 125^\circ) = 50 \text{ Ом;}$$

$$X_{1 \infty} = X_1 + m(X_{12} \cos \Phi_2 + R_{12} \sin \Phi_2) = \\ = -9,5 + 0,5(-7 \cos 125^\circ + 60 \sin 125^\circ) = 15 \text{ Ом.}$$

Расчет характеристики направленности выполним по (8.1), (8.2) (в которых опустим множители систем), (8.3) и (7.10). Расчет приведен в табл. 8.2:

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_p(\varphi); F_1(\varphi) = [\cos(0,5\pi \sin \varphi)]^2 / \cos \varphi;$$

$$F_p(\varphi) = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\Phi_2 - kd_p \cos \varphi)};$$

$$F_p(\Delta) = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\Phi_2 - kd_p \cos \Delta)}.$$

50

Таблица 8.2

Расчет характеристики направленности вибратора с рефлектором примера 8.1

$\varphi; \Delta$	0	30	60	90	120	150	180
$kd_p \cos \varphi$	55,5	48	27,8	0	-27,8	-48	-55,5
$\cos(\Phi_2 - kd_p \cos \varphi)$	0,35	0,225	-0,125	-0,42	-0,89	-0,99	-1
$F_p(\varphi) = F_p(\Delta)$	1,26	1,20	1,06	0,91	0,60	0,50	0,50
$F(\Delta)_H$	1	0,95	0,84	0,72	0,47	0,4	0,4
$F_1(\varphi)$	1	0,7	0,21	0	-0,21	-0,7	-1
$F(\varphi)$	1	0,665	0,177	0	-0,1	-0,28	-0,4

Нормированное значение  $F(\Delta)_H = F(\Delta) / F(\Delta)_{max}$ ;

$$k_{3ам} = F^2(\varphi=0) / F^2(\varphi=\pi) = 1^2 / (-0,4)^2 = 6,25 \text{ (7,96 дБ).}$$

Пример 8.2. Рассчитать и построить характеристики направленности синфазной антенны (без учета влияния земли), состоящей из двух симметричных волновых вибраторов с аперриодическим рефлектором (рис. 8.5) с размерами  $d=4$  м,  $d_p=1$  м при работе на волне 4 м.

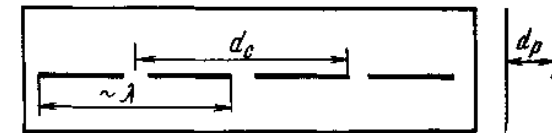


Рис. 8.5. Антенна СГ (1/4) РА к примеру 8.2

Решение. Расчет характеристики направленности выполним по формулам: в плоскости  $E$   $F(\varphi) = F_1(\varphi) F_c(\varphi) F_p(\varphi)$ ; в плоскости  $H$   $F(\Delta) = F_p(\Delta) = F_p(\varphi)$ .

Ширина диаграммы направленности в основном определяется множителем системы. Найдем направления нулевых излучений значений множителя  $F_c(\varphi)$  из (6.15):

$$\sin \varphi_{01} = \lambda / nd = 4 / 2 \cdot 4 = 0,5; \varphi_{01} = 30^\circ;$$

$$\sin \varphi_{02} = 2\lambda / nd = 2 \cdot 4 / 2 \cdot 4 = 1; \varphi_{02} = 90^\circ;$$

$$\sin \varphi_{03} = 3 \cdot 4 / 2 \cdot 4 > 1 \text{ смысла не имеет.}$$

Расчет выполним для  $0 < \varphi < 30^\circ$  через  $10^\circ$  и для  $\varphi > 30^\circ$  через  $15^\circ$ . Используя (7.11), (8.13), (8.8), (8.9) и опуская в последних двух уравнениях постоянные коэффициенты 2, имеем:

$$0,5nkd = 0,5 \cdot 2 \cdot 360 \cdot 4 / 4 = 360^\circ; 0,5kd = 180^\circ; kd_p = 360 \cdot 1/4 = 90^\circ.$$

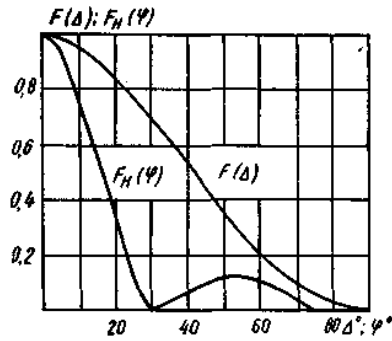
Расчет характеристик сведен в табл. 8.3, построение диаграмм направленности приведено на рис. 8.6.

Пример 8.3. Приемная антенна бегущей волны состоит из 15 вертикальных несимметричных вибраторов (рис. 8.7а) высотой по 8 м. Расстояние между вибраторами 71,5 м, коэффициент уко-

Таблица 8.3

Расчет характеристики направленности синфазной антенны примера 8.2

φ, град	0	10	20	30	45	60	75	90
0,5nkd sin φ	0	62,5	123	180	254	312	348	360
sin (0,5nkd sin φ)	0	0,89	0,84	0	-0,96	-0,74	-0,21	0
sin (0,5kd sin φ)	0	0,52	0,88	1	0,8	0,41	0,1	0
F <sub>c</sub> (φ)	2	1,7	0,95	0	-1,2	-1,82	-2	-2
kd <sub>p</sub> sin φ	0	15,6	30,8	45	63,5	78	87	90
F <sub>p</sub> (φ)	1	0,96	0,86	0,71	0,45	0,21	0,05	0
F <sub>1</sub> (φ)	1	0,95	0,79	0,58	0,35	0,09	0,01	0
F(φ)	2	1,55	0,65	0	-0,19	-0,03	0	0
F(φ) <sub>н</sub>	1	0,77	0,32	0	-0,1	-0,01	0	0
F(Δ)	1	0,96	0,86	0,71	0,45	0,21	0,05	0



рочения волны в антенне 1,02. Рассчитать характеристики направленности антенны при работе на частоте 375 кГц для почвы с идеальной проводимостью.

Рис. 8.6. Диаграмма направленности антенны СГ (1/4) РА

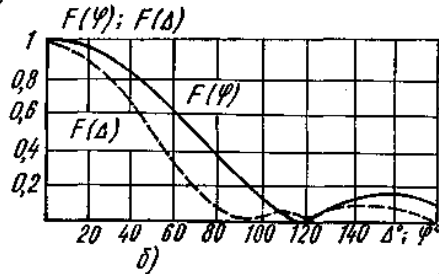
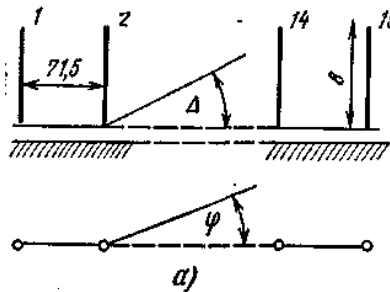


Рис. 8.7. Антенна БВН (15/8) (0/71,5) (а) и ее диаграмма направленности на частоте 375 кГц (б) примера 8.3

Решение. Длина волны  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 375 \cdot 10^3 = 880$  м. Расчет характеристики направленности в горизонтальной плоскости выполним по (8.14), полагая в ней  $\Delta = 0$ :

$$F(\varphi) = F_c(\varphi) = \frac{\sin [0,5 nkd (\xi - \cos \varphi)]}{\sin [0,5 kd (\xi - \cos \varphi)]}$$

В вертикальной плоскости  $F(\Delta) = F_1(\Delta) F_c(\Delta)$ .

Для короткого вибратора, когда  $l \ll \lambda (8 \ll 400)$ ,  $F_1(\Delta) = \cos \Delta$ ;  $F_c(\Delta)$  определим по (8.14), приняв в ней  $\varphi = 0$ :

$$F(\Delta) = \cos \frac{\sin [0,5 nkd (\xi - \cos \Delta)]}{\sin [0,5 kd (\xi - \cos \Delta)]};$$

$$0,5kd = 0,5 \cdot 360 \cdot 71,5 / 800 = 16,1^\circ; \quad 0,5nkd = 241^\circ.$$

Углы, соответствующие направлениям нулевого приема (8.16),

$$\cos \varphi_{01} = \xi - \lambda / nd = 1,02 - 800 / 15 \cdot 71,5 = 0,275; \quad \varphi_{01} = 74,2^\circ;$$

$$\cos \varphi_{02} = 1,02 - 2 \cdot 800 / 15 \cdot 71,5 = -0,47; \quad \varphi_{02} = 118^\circ;$$

$$\cos \varphi_{03} = 1,02 - 3 \cdot 800 / 15 \cdot 71,5 = -1,22 \text{ смысла не имеет.}$$

Расчет выполнен в виде табл. 8.4, построение диаграмм направленности приведено на рис. 8.7б.

Таблица 8.4

Расчет характеристики направленности антенны примера 8.3

φ: Δ°	0	20	40	74,2	90	118	140	180
cos φ; cos Δ	1	0,94	0,76	0,27	0	-0,47	-0,77	-1
ξ - cos φ	0,02	0,07	0,26	0,75	1,02	1,49	1,79	2,02
nX	4,8	19,3	63,5	180	246	360	430	486
sin (nX)	0,084	0,33	0,89	0	-0,91	0	0,94	-0,81
X	0,032	1,29	4,25	12,1	16,4	24	28,7	32,5
sin X	0,005	0,02	0,07	0,21	0,28	0,41	0,48	0,54
sin nX / sin X	15	14,3	1,21	0	-3,27	0	1,95	1,5
F(Δ)	1	0,95	0,81	0	-0,22	0	1,3	0,1
F(Δ) <sub>н</sub>	1	0,89	0,62	0	0	0	-0,1	-0,1

В табл. 8.4 принято обозначение  $X = 0,5kd (\xi - \cos \varphi)$ .

Пример 8.4. Горизонтальный симметричный вибратор расположен на высоте 30 м над идеально проводящей землей. Рассчитать характеристику направленности в вертикальной плоскости при работе на частоте 10 МГц (30 м).

Решение. Направления, соответствующие максимальным и нулевым излучениям, определим, используя (8.19) и (8.20):

$$\sin \Delta_{m1} = \lambda / 4H = 30 / 4 \cdot 30 = 0,25; \quad \Delta_{m1} = 14,5^\circ;$$

$$\sin \Delta_{m2} = 3\lambda / 4 = 3 \cdot 30 / 4 \cdot 30 = 0,75; \quad \Delta_{m2} = 48,5^\circ;$$

$$\Delta_{01} = 0; \quad \sin \Delta_{02} = \lambda / 2H = 30 / 2 \cdot 30 = 0,5; \quad \Delta_{02} = 30^\circ;$$

$$\sin \Delta_{03} = 2\lambda / 2H = 2 \cdot 30 / 2 \cdot 30 = 1; \quad \Delta_{03} = 90^\circ.$$

$$kH = 2\pi H / \lambda = 360 \cdot 30 / 30 = 360^\circ.$$

Расчет  $F_{г.д}(\Delta)$  выполним по (8.18), опустив в ней постоянный множитель 2, не влияющий на диаграмму направленности.

Δ, град	0	10	14,5	20	30	48,5	70	90
kh sin Δ, град	0	62,5	90	123	180	270	338	360
F <sub>г.д</sub> (Δ)	0	0,89	1	0,84	0	-1	-0,74	0

Знак «-», характеризующий изменение фазы поля на  $180^\circ$ , при построении диаграммы направленности опускают.

Пример 8.5. Симметричный вибратор с длиной плеча  $0,3\lambda$  расположен на расстоянии  $0,25\lambda$  от идеального плоского рефлектора. Определить внесенное сопротивление.

Решение. Заменяем рефлектор зеркальным отображением вибратора. Расстояние между вибратором и зеркальным отображением  $d/\lambda = 2 \cdot 0,25 = 0,5$ . Для  $d/\lambda = 0,5$  и  $l = 0,3\lambda$  по кривым рис. 8.3 и 8.4 находим  $R_{12} = -10$  Ом и  $X = -46$  Ом. Учитывая, что ток в зеркальном отображении сдвинут по фазе относительно тока вибратора на  $180^\circ$ , внесенные сопротивления будут иметь обратные знаки:  $R_{вн} = 10$  Ом и  $X_{вн} = 46$  Ом.

Пример 8.6. Плоский рефлектор состоит из параллельных проводников радиусом 3 мм с расстоянием между ними 50 мм. Определить коэффициент прохождения при работе на волне 20 см.

Решение. Коэффициент прохождения определим по (8.23):

$$\sigma = 1 : \left\{ 1 + \left[ \frac{\lambda}{4,6 d \lg(2\pi r/d)} \right]^2 \right\} = 1 : \left\{ 1 + \left[ \frac{200}{4,6 \cdot 50 \lg(2 \cdot 3,14 \cdot 3/50)} \right]^2 \right\} = 0,19;$$

$$\lg(2 \cdot 3,14 \cdot 3/50) = \lg(0,377) = \bar{1},576 = -0,424.$$

Пример 8.7. Панель антенны для передачи телевидения состоит из двух полуволновых вибраторов (рис. 8.8). Расстояние

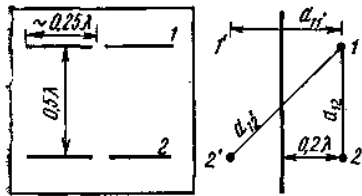


Рис. 8.8. Панель антенны из двух полуволновых вибраторов с аперiodическим рефлектором примера 8.7

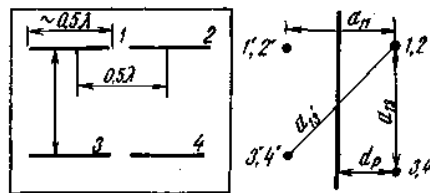


Рис. 8.9. К определению сопротивления излучения панельной антенны из двух волновых вибраторов с аперiodическим рефлектором примера 8.8

между вибраторами  $0,5\lambda$ , расстояние от вибраторов до аперiodического рефлектора  $0,2\lambda$ . Определить сопротивление излучения.

Решение. Собственное сопротивление  $Z_{11}$  и сопротивления связи определим по кривым рис. 8.1 и 8.2:

$$Z_{11}(a/\lambda = 0; b/\lambda = 0) = 73,1 + i 42,5 \text{ Ом}; Z_{12}(a/\lambda = 0; b/\lambda = 0,5) = -12,5 - i 30 \text{ Ом};$$

$$Z_{11}(a/\lambda = 0; b/\lambda = 0,4) = 6,2 - i 37,5 \text{ Ом}; Z_{12}(a/\lambda = 0; b/\lambda = 0,64) =$$

$$= -25 - i 9,5 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление каждого вибратора

$$Z = Z_{11} + Z_{12} - (Z_{11'} + Z_{12'}) = 73,1 + i 42,5 - 12,5 - i 30 - 6,2 - i 37,5 - 25 - i 9,5 = 79,4 + i 31,5 \text{ Ом}.$$

Для полуволнового вибратора входное сопротивление численно равно сопротивлению излучения, отнесенного к пучности тока.

Пример 8.8. Панель антенны состоит из двух волновых вибраторов (рис. 8.9). Расстояние между вибраторами  $d_b = 750$  мм, расстояние от вибраторов до идеального аперiodического рефлектора  $d_p = 420$  мм, частота 200 МГц. Определить сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока.

Решение. Панель из двух волновых вибраторов будем рассматривать как систему, состоящую из четырех полуволновых вибраторов 1, 2, 3 и 4.

$$\text{Длина волны } \lambda = 3 \cdot 10^8 / 200 \cdot 10^6 = 1,5 \text{ м} = 1500 \text{ мм}.$$

Относительные расстояния:

$$d_b/\lambda = 750/1500 = 0,5; d_p/\lambda = 420/1500 = 0,28; a_{11} = a_{12} = 0;$$

$$a_{13} = a_{14} = a_{23} = a_{24} = d_b/\lambda = 0,5; a_{11'} = a_{12'} = a_{22'} = 2d_p/\lambda = 0,56;$$

$$a_{13'} = a_{14'} = a_{23'} = a_{24'} = \sqrt{(2d_p/\lambda)^2 + (d_b/\lambda)^2} = 0,75; b_{11} = b_{13} = b_{22} = b_{24} = b_{11'} = b_{22'} = 0; b_{12} = b_{21} = b_{14} = b_{23} = b_{12'} = b_{14'} = 0,5.$$

Значения собственных и наведенных сопротивлений определим по кривым рис. 8.1 и 8.2:

$$Z_{11}(a=0; b=0) = 73,1 + i 42,5 \text{ Ом}; Z_{12}(a=0; b=0,5) = 26,4 + i 20,2 \text{ Ом};$$

$$Z_{13}(a=0,5; b=0) = -12,5 - i 29,9 \text{ Ом}; Z_{14}(a=0,5; b=0,5) =$$

$$= -11,9 - i 7,9 \text{ Ом}; Z_{11'}(a=0,56; b=0) = -20,1 - i 22 \text{ Ом}; Z_{12'}(a=0,56;$$

$$b=0,5) = -13,8 - i 3 \text{ Ом}; Z_{13'}(a=0,75; b=0) = -22,4 + i 6,6 \text{ Ом};$$

$$Z_{14'}(a=0,75; b=0,5) = -8,4 + i 10,8 \text{ Ом}.$$

Сопротивление излучения полуволнового вибратора с учетом влияния соседних вибраторов и рефлектора

$$Z_1 = Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14} - (Z_{11'} + Z_{12'} + Z_{13'} + Z_{14'}) = 139,8 + i 22,3 \text{ Ом}.$$

Ввиду симметрии  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$ .

Сопротивление излучения волнового вибратора равно сумме сопротивлений излучения двух полуволновых:

$$Z_{\Sigma\lambda} = 2Z_1 = 2(139,8 + i 22,3) = 280 + i 45 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление резонансного волнового вибратора

$$Z_{вх} = W^2/R_{\Sigma\lambda} = W^2_{в}/280 \text{ Ом}.$$

Задача 8.1. Дано: частота, размеры вибратора, рефлектора и расстояние между ними. Определить собственные и взаимные сопротивления.

Вариант	а	б	в	г	д	е
f, МГц	52,5	80	96	186	202	60
2l <sub>1</sub> , мм	2690	1705	1420	716	660	1250
2l <sub>2</sub> , мм	3020	1950	1620	825	760	1300
d <sub>p</sub> , мм	875	844	704	359	330	1000

Задача 8.2. Антенна состоит из активного вибратора и рефлектора. Известны собственное сопротивление рефлектора и сопротивление связи. Определить амплитуду и фазу тока рефлектора. Ток активного вибратора принят равным 1, сопротивление настройки рефлектора 0.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$Z_2$ , Ом	85+i50	80+i30	80+i20	70+i20	60+i87	80+i10
$Z_{12}$ , Ом	60-i10	45-i25	40-i20	45-i20	40-i25	40-i10

Задача 8.3. Антенна состоит из вибратора и рефлектора. Определить коэффициент защитного действия, если известны: расстояние между вибраторами, амплитуда и фаза тока рефлектора.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$m$	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,65
$\Phi_2$ , °	100	120	140	90	120	90
$d_p/\lambda$	0,25	0,2	0,3	0,25	0,2	0,2

Задача 8.4. Определить коэффициент прохождения плоского рефлектора, выполненного из системы параллельных проводников, если известны: частота, расстояние между проводниками и их радиус.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	1500	300	1200	1875	600	1000
$d$ , мм	40	120	62,5	160	85	40
$r$ , мм	2	2	5	4,8	5	2

Задача 8.5. Определить направления максимального и нулевого излучений в вертикальной плоскости горизонтального вибратора, если известны частота и высота расположения вибратора.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	15	20	25	12	12,5	5
$H$ , м	24	21	15	45	40	50

Задача 8.6. Определить направления нулевых излучений синфазной антенны, если известны: частота, число излучателей и расстояния между ними.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	60	75	100	125	150	5
$n$	2	4	6	8	12	8
$d$ , мм	5	4	2	1,2	1	1

## ГЛАВА 9

### ПРИЕМНЫЕ АНТЕННЫ

На основании принципа взаимности приемную антенну можно представить в виде эквивалентного генератора (рис. 9.1) с ЭДС  $\mathcal{E}_a$  и внутренним сопротивлением  $Z_a$ . Наведенная в приемной антенне ЭДС

$$\mathcal{E}_a = L_d E F_n(\Delta; \varphi), \quad (9.1)$$

где  $L_d$  — действующая длина (высота) приемной антенны;  $E$  — напряженность поля принимаемой волны;  $F_n(\Delta; \varphi)$  — нормированный множитель диаграммы направленности приемной антенны.

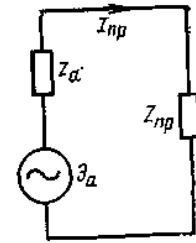


Рис. 9.1. Эквивалентная схема приемной антенны

Ток входа приемника

$$I_{np} = \mathcal{E}_a / (Z_a + Z_{np}), \quad (9.2)$$

где  $Z_a = R_a + iX_a$  — сопротивление антенны;  $Z_{np} = R_{np} + iX_{np}$  — входное сопротивление приемника.

Мощность, отдаваемая антенной в согласованную нагрузку,

$$P = G \lambda^2 E^2 F_n^2(\Delta; \varphi) \eta_\Phi / 2900, \quad (9.3)$$

где  $G$  — коэффициент усиления приемной антенны относительно полуволнового вибратора;  $\eta_\Phi$  — КПД фидера.

Действующая длина симметричного полуволнового вибратора

$$L_d = \lambda / \pi. \quad (9.4)$$

В общем случае действующая длина приемной антенны

$$L_d = (\lambda / \pi) \sqrt{G}. \quad (9.5)$$

Улучшение отношения сигнал/помеха за счет применения направленной антенны оценивается коэффициентом помехозащитности

$$K_{пз} = 20 \lg [F(\Delta_c; \varphi_c) / F(\Delta_n; \varphi_n)], \quad (9.6)$$

где  $\Delta_c$  и  $\varphi_c$  — углы, соответствующие направлению на источник сигнала;  $\Delta_n$  и  $\varphi_n$  — углы, соответствующие направлению на источник помехи;  $K_{пз}$  выражается в децибелах.

Напряжение и мощность входа приемника связаны соотношением

$$U_{np} = \sqrt{PR_{np}}. \quad (9.7)$$

Пример 9.1. Симметричный полуволновый вибратор расположен в свободном пространстве с напряженностью поля 1 мВ/м. Определить ЭДС, наведенную в вибраторе на частоте 60 МГц при приходе волны с главного направления  $\varphi = 0$  и под углами 30 и 60°.

Решение. Длина волны  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 60 \cdot 10^6 = 5$  м.

Действующая длина полуволнового вибратора (9.4)

$$L_d = \lambda / \pi = 5 / 3,14 = 1,59 \text{ м.}$$

Наведенные в вибраторе ЭДС (9.1), (7.10):

$$\mathcal{E}_a = L_d E F_n(\varphi) = 1,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 1,59 \text{ мВ при } \varphi = 0;$$



$$\mathcal{E}_a = \frac{1,59 \cdot 10^{-3} \cos(90^\circ \sin 30^\circ)}{\cos 30^\circ} = 0,0013 \text{ В при } \varphi = 30^\circ;$$

$$\mathcal{E}_a = \frac{1,59 \cdot 10^{-3} \cos(90^\circ \sin 60^\circ)}{\cos 60^\circ} = 0,00066 \text{ В при } \varphi = 60^\circ.$$

Пример 9.2. Трехэлементная АТВК с коэффициентом усиления 3,4 (относительно полуволнового вибратора) посредством коаксиального кабеля РК 75—4—16 длиной 20 м соединена с приемником. Определить мощность и напряжение на входе согласованного приемника, если известны частота 62 МГц и напряженность поля 1 мВ/м. Входное сопротивление приемника 75 Ом.

Решение. Коаксиальный кабель РК 75—4—16 на частоте 62 МГц (см. табл. 11.3) имеет погонное затухание 0,1 дБ/м. Полное затухание кабеля  $0,1 \cdot 20 = 2$  дБ. Затуханию 2 дБ соответствует ослабление по мощности в 1,58 раза. Коэффициент полезного действия коаксиального кабеля  $\eta_\phi = 1/1,58 = 0,63$ . Длина волны 4,84 м.

Мощность и напряжение на входе приемника:

$$P = G \lambda^2 E^2 F_n^2(\varphi) \eta_\phi / 2900 = 3,4 \cdot 4,84^2 \cdot (10^{-3})^2 \cdot 1^2 \cdot 0,63 / 2900 = 17,2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт};$$

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{PR_{\text{пр}}} = \sqrt{17,2 \cdot 10^{-9} \cdot 75} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 1,3 \text{ мВ}.$$

Пример 9.3. Определить действующую длину антенны, если известно, что при работе на волне 4 м  $G$  антенны относительно полуволнового вибратора равен 11,76 дБ.

Решение. Используя (6.18) и (9.5), имеем:

$$G = 10 \lg G; \lg G = 11,76/10 = 1,176; G = 15$$

$$L_d = \lambda \sqrt{G} / \pi = 4 \sqrt{15} / 3,14 = 4,9 \text{ м}.$$

Пример 9.4. Определить коэффициент помехозащищенности при приеме на симметричный полуволновый вибратор, если угол между направлениями на источник сигнала и помехи составляет  $20^\circ$  для двух случаев: а) антенна ориентирована максимумом приема на источник сигнала; б) направление на источник сигнала смещено относительно направления максимального приема на  $60^\circ$ , а помехи — на  $80^\circ$ .

Решение. Используя (9.6) и (7.10), имеем:

$$K_{\text{пз}} = 20 \lg \frac{F(\varphi_c)}{F(\varphi_n)} = 20 \lg \left[ \frac{\cos(90^\circ \sin 0^\circ) \cos 20^\circ}{\cos 0^\circ \cos(90^\circ \sin 20^\circ)} \right] = 0,8 \text{ дБ};$$

$$K_{\text{пз}} = 20 \lg \left[ \frac{\cos(90^\circ \sin 60^\circ) \cos 80^\circ}{\cos 60^\circ \cos(90^\circ \sin 80^\circ)} \right] = 9 \text{ дБ}.$$

Помехозащищенность лучше, когда направление на помеху совпадает или близко к направлению «нулевого» приема.

Задача 9.1. Определить мощность и напряжение входа приемника по заданным длине волны, коэффициенту усиления, КПД фидера и напряженности поля. Антенна, фидер и вход приемника согласованы. Входное сопротивление приемника 75 Ом.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\lambda$ , м	4,84	3,75	3,13	1,61	1,41	5
$G$	3,4	5,3	5,3	7,1	7,1	30
$E$ мВ/м	1	1,5	1	1,5	2	0,5
$\eta_\phi$	0,8	0,75	0,75	0,6	0,55	0,7

Задача 9.2. Определить ток входа приемника по условиям задачи 9.1.

Задача 9.3. Определить действующую длину антенны по условиям задачи 9.1.

## ГЛАВА 10

### ФИДЕРЫ

#### 10.1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Фидером называют линию, соединяющую антенну с приемником или передатчиком.

Модуль коэффициента отражения  $|p|$ , волновое сопротивление фидера  $W_\phi$  и сопротивление нагрузки  $Z_n = R_n + iX_n$  связаны между собой уравнением

$$|p| = \sqrt{\frac{(R_n - W_\phi)^2 + X_n^2}{(R_n + W_\phi)^2 + X_n^2}} \quad (10.1)$$

Коэффициент бегущей волны в фидере

$$K_{б.в} = (1 - |p|) : (1 + |p|). \quad (10.2)$$

Максимальное эффективное значение напряжения на фидере

$$U_m = \sqrt{PW_\phi / K_{б.в}} \quad (10.3)$$

Максимальное эффективное значение тока в фидере

$$I_m = \sqrt{P / W_\phi K_{б.в}} \quad (10.4)$$

Коэффициент затухания фидера

$$\alpha = R_1 / 2W_\phi, \quad (10.5)$$

где  $R_1$  — сопротивление потерь на единицу длины, Ом/м.

Коэффициент полезного действия согласованного фидера (при  $K_{б.в} = 1, p = 0$ )

$$\eta_0 = e^{-2\alpha L}. \quad (10.6)$$

В фидерах с малым затуханием, когда  $2\alpha L \leq 0,25$ , можно пользоваться приближенной формулой, дающей погрешность менее 5%, полагая

$$\eta_0 = 1 - 2\alpha L. \quad (10.7)$$

Здесь  $L$  — длина фидера, м.

При неполном согласовании коэффициент полезного действия фидера уменьшается и определяется по кривым рис. 10.1 или по формуле

$$\eta = 4\eta_0 : [(1 - \eta_0^2) (1/K_{б.в} + K_{б.в}) + 2(1 + \eta_0^2)].$$

## 10.2. СИММЕТРИЧНЫЕ ФИДЕРЫ

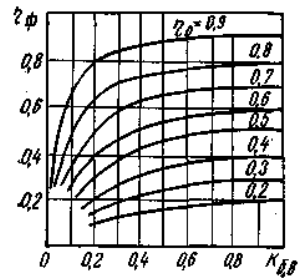


Рис. 10.1. Зависимость коэффициента полезного действия фидера от коэффициента бегущей волны в нем

Волновое сопротивление симметричного двухпроводного фидера (рис. 10.2а)

$$W_{\phi} = 276 \lg(2D_1/d). \quad (10.8)$$

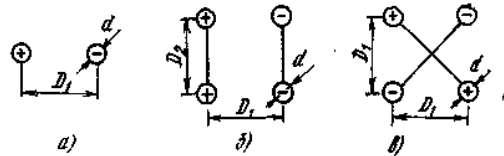


Рис. 10.2. Сечения симметричных фидеров: а — двухпроводного; б — четырехпроводного; в — четырехпроводного перекрещенного

Волновое сопротивление четырехпроводного фидера (рис. 10.2б)

$$W_{\phi} = 138 \lg \frac{2D_1 \sqrt{D_1^2 + D_2^2}}{dD_2}. \quad (10.9)$$

Здесь  $D_1$  — расстояние между разнополярными проводниками;  $D_2$  — расстояние между однополярными проводниками.

Сопротивление потерь на единицу длины двухпроводного фидера, Ом/м, выполненного из медных или биметаллических проводов,

$$R_1 = 2,96/d\sqrt{\lambda}, \quad (10.10)$$

четырёхпроводного

$$R_1 = 1,48/d\sqrt{\lambda}. \quad (10.11)$$

В формулах (10.10) и (10.11)  $d$  — в мм;  $\lambda$  — в м.

Максимальная напряженность поля у поверхности проводника при напряжении  $U$  между проводниками двухпроводного фидера

$$E_{max} = U/2,3d \lg(2D_1/d). \quad (10.12)$$

В приемных и мощных передающих антеннах с целью уменьшения антенного эффекта фидера применяют перекрещенные фидеры. Волновое сопротивление четырехпроводного перекрещенного фидера (рис. 10.2в), Ом,

$$W_{\phi} = 138 \lg(\sqrt{2}D_1/d). \quad (10.13)$$

## 10.3. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ФИДЕРЫ

Волновое сопротивление коаксиального фидера (рис. 10.3а)

$$W_{\phi} = \frac{138}{\sqrt{1+a(\epsilon'-1)}} \lg \frac{D}{d}, \quad (10.14)$$

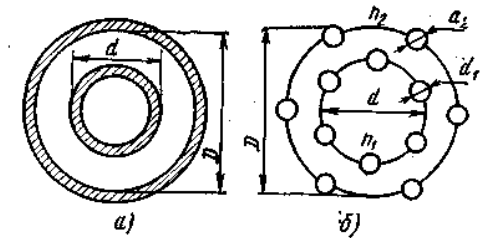


Рис. 10.3. Сечения коаксиальных фидеров: а — трубчатого; б — многопроводного

где  $a$  — коэффициент заполнения фидера диэлектриком;  $\epsilon'$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Длина волны в коаксиальном фидере

$$\lambda_{\phi} = \lambda / \sqrt{1+a(\epsilon'-1)}. \quad (10.15)$$

Коэффициент укорочения волны в коаксиальном фидере

$$\xi = \sqrt{1+a(\epsilon'-1)}. \quad (10.16)$$

Сопротивление потерь в меди на единицу длины, Ом/м,

$$R_1 = \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \frac{1,48}{\sqrt{\lambda}}. \quad (10.17)$$

Здесь размерности величин:  $D$ , мм;  $d$ , мм;  $\lambda$ , м.

Критическая длина волны, короче которой энергию по коаксиальному фидеру передавать нельзя,

$$\lambda_{кр} = 2l \sqrt{1+a(\epsilon'-1)}, \quad (10.18)$$

где  $l$  — расстояние между диэлектрическими шайбами.

Напряженность электрического поля на поверхности внутреннего проводника коаксиального фидера

$$E = U/1,15d \lg(D/d). \quad (10.19)$$

Волновое сопротивление многопроводного фидера (рис. 10.3б)

$$W_{\phi} = 138 \lg(D_0/d_0), \quad (10.20)$$

где  $D_0 = D \sqrt{\frac{n_2}{D \ln n_2 d_2}}$ ;  $d_0 = d \sqrt{\frac{n_1}{n_1 d_1 d}}$ .

Здесь:  $n_1$  — число внешних проводов;  $d_1$  — диаметр внешних проводов;  $D$  — диаметр образующей расположения внешних проводов;  $n_2$  — число внутренних проводов;  $d_2$  — диаметр внутренних проводов;  $d$  — диаметр образующей расположения внутренних проводов.

Сопротивление потерь в проводниках на единицу длины, Ом/м, многопроводного фидера, выполненного из меди или биметалла (см. рис. 10.3б),

$$R_1 = \left( \frac{1}{n_1 d_1} + \frac{1}{n_2 d_2} \right) \frac{1,48}{\sqrt{\lambda}}, \quad (10.21)$$

где размерности величины таковы:  $d_1$  и  $d_2$ , мм;  $\lambda$ , м.

#### 10.4. ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДЫ

В волноводах с прямоугольным сечением основным типом является волна  $H_{10}$ . Волны длиннее критической в волноводе не распространяются. Критическая длина волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{кр} = 2a, \quad (10.22)$$

где  $a$  — внутренний размер широкой стенки волновода.

Длина волны  $H_{10}$  в волноводе прямоугольного сечения

$$\lambda_{в} = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}, \quad (10.23)$$

где  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве.

Для распространения в волноводе только волны  $H_{10}$  внутреннее сечение прямоугольного волновода выбирают из условий:

$$0,95\lambda_{кр} \geq a \geq 0,525\lambda_{дл}; \quad b < 0,5\lambda_{кр}, \quad (10.24); \quad (10.25)$$

где  $b$  — внутренний размер узкой стенки волновода.

Сечения волноводов рекомендуется выбирать в соответствии с табл. 10.1.

Таблица 10.1

Рекомендуемые размеры внутренних сечений прямоугольных волноводов и максимальные затухания в них на частоте  $1,5f_{кр}$

Сечение, мм <sup>2</sup>	Затухание, дБ/м	Сечение, мм <sup>2</sup>	Затухание, дБ/м	Сечение, мм <sup>2</sup>	Затухание, дБ/м
3,6×1,8	2	19×9,5	0,16	90×45	0,017
4,4×2,2	1,3	23×10	0,13	110×55	0,012
5,2×2,6	1	28,5×12,5	0,1	130×65	0,009
6,2×3,1	0,8	35×15	0,07	160×80	0,006
7,2×3,4	0,73	40×20	0,054	196×98	0,005
9,0×4,5	0,54	48×24	0,043	248×124	0,004
11×5,5	0,33	58×29	0,031	270×135	0,003
13×6,5	0,3	72×34	0,024	292×146	0,003
16×8,0	0,22				

Затухание  $\alpha$ , дБ/м, волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе

$$\alpha = \frac{0,793 [1 + (2b/a)(\lambda/2a)^2]}{b \sqrt{\sigma \lambda} [1 - (\lambda/2a)^2]}, \quad (10.26)$$

где  $\sigma$  — проводимость материала стенок волновода, См/м (табл. 10.2);  $a$  и  $b$  — внутренние размеры сечения волновода, м.

#### 10.5. КРУГЛЫЕ ВОЛНОВОДЫ

Основным типом для волноводов круглого сечения является волна  $H_{11}$ . Для распространения в волноводе только волны  $H_{11}$  внутренний диаметр волновода должен удовлетворять условию

$$0,586\lambda_{дл} < D < 0,764\lambda_{кр}. \quad (10.27)$$

Таблица 10.2

Проводимость некоторых материалов при постоянном токе

Материал	$\sigma$ , См/м	Материал	$\sigma$ , См/м	Материал	$\sigma$ , См/м
Алюминий	$3,48 \cdot 10^7$	Латунь Л-70	$1,65 \cdot 10^7$	Никель	$1,2 \cdot 10^7$
Медь	$5,8 \cdot 10^7$	Латунь Л-60	$1,51 \cdot 10^7$	Мягкая сталь	$0,74 \cdot 10^7$
Латунь Л-96	$4,07 \cdot 10^7$	Олово	$0,65 \cdot 10^7$	Паладий	$0,907 \cdot 10^7$
Латунь Л-90	$2,52 \cdot 10^7$	Сталь	$0,74 \cdot 10^7$		
Латунь Л-80	$1,88 \cdot 10^7$	Серебро	$6,27 \cdot 10^7$		

Затухание волны  $H_{11}$  в круглом волноводе, дБ/м

$$\alpha = \frac{0,793 [0,087 (\lambda/r)^2 + 0,43]}{r \sqrt{\sigma \lambda} \sqrt{1 - 0,087 (\lambda/r)^2}}, \quad (10.28)$$

где  $r$  — внутренний радиус волновода, м.

Для уменьшения затухания диаметры круглых волноводов берут большими, чем это определяется условием (10.27). Например, волноводы диаметром 70 мм рекомендуется применять на частотах 6 ГГц и выше. В этом случае в волноводе могут возникнуть волны высших порядков, которые необходимо подавлять.

#### 10.6. ФИДЕРНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Для согласования волнового сопротивления фидера  $W_{\phi}$  с активной нагрузкой  $R_H$  используют отрезки линий, равные четверти длины волны в трансформаторе, с волновым сопротивлением

$$W_{тр} = \sqrt{W_{\phi} R_H}. \quad (10.29)$$

Более широкополосным является двухступенчатый трансформатор. Волновые сопротивления его ступеней определяются уравнениями:

$$W_{тр1} = \sqrt{W_{\phi} \sqrt{W_{\phi} R_H}}; \quad W_{тр2} = \sqrt{R_H \sqrt{R_H W_{\phi}}}. \quad (10.30); \quad (10.31)$$

Для расширения полосы рабочих частот между высокоомным входом  $W_2$  и трансформатором последовательно включают разомкнутый шлейф (рис. 10.4) с волновым сопротивлением

$$W_{ш.х} = 0,5(W_2 - W_1) \sqrt{W_2/W_1} \quad (10.32)$$

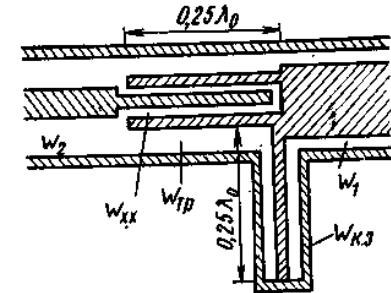


Рис. 10.4. Четвертьволновый трансформатор с реактивными элементами, расширяющими полосу пропускания

и параллельно низкоомному входу  $W_1$  подключают короткозамкнутый шлейф с волновым сопротивлением

$$W_{к.з} = 2W_1 \sqrt{W_1 W_2} / (W_2 - W_1). \quad (10.33)$$

При расчете экспоненциального трансформатора по допустимому ухудшению КБВ определяют параметр  $A$ :

$$A = 8\pi(1 - K_{б.в}) / (1 + K_{б.в}) \lambda_{max}. \quad (10.34)$$

Необходимая длина экспоненциального трансформатора

$$L_{тр} = (2,3/A) \lg(W_{\phi}/R_{н}). \quad (10.35)$$

Волновые сопротивления сечений трансформатора, отстоящих на расстояниях  $x$  от нагрузки до рассматриваемого сечения,

$$W_x = R_{н} e^{-Ax}. \quad (10.36)$$

В диапазоне декаметровых волн экспоненциальные трансформаторы выполняют ступенчатыми. Всю длину трансформатора  $L_{тр}$  делят на несколько (10—20) участков, и для каждого из этих участков определяют волновые сопротивления данного сечения по (10.36). Условное обозначение ТФ2(700/350) означает, что данный экспоненциальный трансформатор фидерный, двухпроводный с переходом с 700 на 350 Ом. Четырехпроводный экспоненциальный трансформатор, используемый в ромбических антеннах, имеет обозначение ТФ4(300/600).

При согласовании приемных антенн для уменьшения антенного эффекта трансформатора применяют четырехпроводные перекрещенные экспоненциальные фидерные трансформаторы, например ТФ4П(340/208) и ТФ4П(250/208). Перекрещенный трансформатор с высоким волновым сопротивлением выполнить затруднительно, возрастают размеры его поперечного сечения. В этих случаях используют двухпроводные или четырехпроводные трансформаторы, например ТФ4(400/250), выполняя их проводом малого диаметра (1,5 мм).

При выполнении трансформаторов из отрезков коаксиальных кабелей необходимо учитывать коэффициент укорочения волны в них

$$\xi = WC'_1/3333, \quad (10.37)$$

где  $W$  — волновое сопротивление кабеля, Ом;  $C'_1$  — погонная емкость кабеля, пФ/м.

Пример 10.1. Симметричный двухпроводный фидер длиной 500 м нагружен входным сопротивлением антенны 500+15 Ом. К фидеру на волне 20 м подводится мощность 15 кВт. Фидер выполнен из медных проводов диаметром 4 мм с расстоянием между проводами 400 мм. Определить КПД,  $K_{б.в}$ , напряжения и токи фидера.

Решение. Волновое сопротивление фидера (10.8)

$$W_{\phi} = 276 \lg(2D_1/d) = 276 \lg(2 \cdot 400/4) = 636 \text{ Ом}.$$

Модуль коэффициента отражения (10.1)

$$|\rho| = \sqrt{\frac{(R_{н} - W_{\phi})^2 + X_{н}^2}{(R_{н} + W_{\phi})^2 + X_{н}^2}} = \sqrt{\frac{(500 - 635)^2 + 50^2}{(500 + 635)^2 + 50^2}} = 0,126.$$

Коэффициент бегущей волны в фидере (10.2)

$$K_{б.в} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|} = \frac{1 - 0,126}{1 + 0,126} = 0,775.$$

Эффективное значение напряжения в максимуме на фидере

$$U_{max} = \sqrt{\frac{PW_{\phi}}{K_{б.в}}} = \sqrt{\frac{15 \cdot 10^3 \cdot 635}{0,775}} = 3500 \text{ В}.$$

Эффективное значение напряжения в минимуме

$$U_{min} = K_{б.в} U_{max} = 0,775 \cdot 3500 = 2700 \text{ В}.$$

Эффективные значения токов в максимуме и минимуме:

$$I_{max} = \sqrt{P/W_{\phi}K_{б.в}} = \sqrt{15000/635 \cdot 0,775} = 5,55 \text{ А};$$

$$I_{min} = P/U_{max} = 15000/3500 = 4,3 \text{ А}.$$

Погонное сопротивление потерь в фидере (10.10)

$$R_1 = 2,96/d \sqrt{\lambda} = 2,96/4 \sqrt{20} = 0,165 \text{ Ом/м}.$$

Коэффициент затухания фидера (10.5)

$$\alpha = R_1/2W_{\phi} = 0,165/2 \cdot 635 = 1,29 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент полезного действия согласованного фидера (10.6)

$$\eta_0 = e^{-2\alpha L} = e^{-2 \cdot 1,29 \cdot 0,0001 \cdot 500} = 0,879.$$

Выполняя расчет по приближенной формуле (10.7), имеем

$$\eta_0 = 1 - 2\alpha L = 1 - 0,138 = 0,871.$$

С учетом коэффициента бегущей волны в фидере определим КПД по кривым рис. 10.1. Значениям  $\eta_0 = 0,87$  и  $K_{б.в} = 0,775$  соответствует значение  $\eta_{\phi} = 0,85$ . Фидер достаточно хорошо согласован, и за счет незначительного рассогласования уменьшения КПД практически не произошло.

Эффективное значение максимальной напряженности поля у поверхности проводов фидера (10.19)

$$E_{max} U/2,3d \lg(2D_1/d) = 3500/2,3 \cdot 0,004 \lg(2 \cdot 400/4) = 165000 \text{ В/м} = 1650 \text{ В/см}.$$

В диапазоне коротких волн допустимой считают амплитуду напряженности поля при 6000—8000 В/см телеграфной манипуляции и 10000—11000 В/см при амплитудной модуляции.

Пример 10.2. Четырехпроводный фидер выполнен из биметаллических проводов диаметром 4 мм. Расстояние между центрами разнополярных проводов 250 мм, однополярных — 400 мм, длина фидера 400 м. Определить параметры фидера при работе на волне 25 м.

Решение. Волновое сопротивление фидера (10.9)

$$W_{\phi} = 138 \lg \frac{2D_1 \sqrt{D_1^2 + D_2^2}}{dD_2} + 138 \lg \frac{2 \cdot 250 \sqrt{250^2 + 400^2}}{4 \cdot 400} = 350 \text{ Ом}.$$

Погонное сопротивление (10.11)

$$R_1 = 1,48/d \sqrt{\lambda} = 1,48/4 \sqrt{25} = 0,074 \text{ Ом/м.}$$

Коэффициент затухания фидера (10.5)

$$\alpha = R_1/2W_\phi = 0,074/2 \cdot 350 = 1,05 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент полезного действия согласованного фидера (10.6)

$$\eta_0 = e^{-2\alpha L} = e^{-2 \cdot 0,000105 \cdot 400} = 0,919.$$

Применив приближенную формулу (10.7), получим  $\eta_0 = 1 - 2\alpha L = 1 - 0,084 = 0,916$ . Поскольку затухание в фидере мало, обе формулы дают примерно одинаковые результаты.

Пример 10.3. Определить основные параметры коаксиального фидера с воздушно-керамической изоляцией на волне 1,5 м. Внутренний диаметр внешнего проводника 18 мм, наружный диаметр внутреннего проводника 5 мм, материал — медь. Толщина диэлектрических шайб  $\Delta = 6$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon' = 5$ , расстояние между шайбами  $l = 120$  мм.

Решение. Коэффициент заполнения фидера диэлектриком

$$\alpha = \Delta/l = 6/120 = 0,05.$$

Волновое сопротивление коаксиального фидера (10.14)

$$W = \frac{138}{\sqrt{1+\alpha(\epsilon'-1)}} \lg \frac{D}{d} = \frac{138}{\sqrt{1+0,05(5-1)}} \lg \frac{18}{5} = 70 \text{ Ом.}$$

Критическая длина волны (10.18)

$$\lambda_{кр} = 2l\sqrt{1+\alpha(\epsilon'-1)} = 2 \cdot 120\sqrt{1+0,05(5-1)} = 255 \text{ мм.}$$

Активное сопротивление на единицу длины, Ом/м, обусловленное потерями в металле (меди) (10.17),

$$R_1 = \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d}\right) \frac{1,48}{\sqrt{\lambda}} = \left(\frac{1}{18} + \frac{1}{5}\right) \frac{1,48}{\sqrt{1,4}} = 0,308 \text{ Ом/м}$$

Коэффициент затухания (без учета потерь в диэлектрике)

$$\alpha = R_1/2W = 0,308/2 \cdot 70 = 2,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\text{или } 8,686\alpha = 8,686 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 0,019 \text{ дБ/м.}$$

Коэффициент укорочения волны в фидере (10.16)

$$\xi = \sqrt{1+\alpha(\epsilon'-1)} = \sqrt{1+0,05(5-1)} = 1,1.$$

Длина волны в фидере (10.15)

$$\lambda_\phi = \lambda/\xi = 1,5/1,1 = 1,36 \text{ м.}$$

Напряженность электрического поля на поверхности внутреннего проводника (10.19) в В/мм

$$E = U/1,15d \lg(D/d) = U/1,15 \cdot 51 \lg(1,8/0,5) = 0,313U.$$

Пример 10.4. Для работы в диапазоне частот 5,6—6,2 ГГц выбрать размеры сечения прямоугольного волновода и определить затухание в нем. Волновод выполнен из меди.

Решение. Рабочему диапазону соответствуют длины волн:

$$\lambda_{кор} = c/f_{max} = 3 \cdot 10^8/6,2 \cdot 10^9 = 0,0485 \text{ м} = 4,85 \text{ см;}$$

$$\lambda_{дл} = c/f_{min} = 3 \cdot 10^8/5,6 \cdot 10^9 = 0,0536 \text{ м} = 5,36 \text{ см.}$$

При выборе широкой стенки волновода будем исходить из условия (10.25):  $0,95\lambda_{кор} \geq a \geq 0,525\lambda_{дл}$ ;  $0,95\lambda_{кор} = 0,95 \cdot 4,85 = 4,6 \text{ см} = 46 \text{ мм}$ ;  $0,525\lambda_{дл} = 0,525 \cdot 5,36 = 2,82 \text{ см} = 28,2 \text{ мм}$ .

Для получения минимального затухания выберем максимально допустимую ширину волновода (см. табл. 10.1), равную 40 мм, сечение волновода  $40 \times 20 \text{ мм}^2$ . В исключительных случаях можно использовать волновод с  $a = 0,99\lambda_{кор} = 48 \text{ мм}$  и сечением  $48 \times 24 \text{ мм}^2$ .

Затухание в волноводе на частоте 5,6 ГГц [см. (10.26), табл. 10.2]

$$\alpha = \frac{0,793 [1 + 2(b/a)(\lambda/2a)^2]}{b\sqrt{\sigma\lambda}\sqrt{1-(\lambda/2a)^2}} = \frac{0,793 [1 + 2(20 \cdot 10^{-3}/40 \cdot 10^{-3})(5,36 \cdot 10^{-2}/2 \cdot 40 \cdot 10^{-3})^2]}{20 \cdot 10^{-3} \sqrt{5,8 \cdot 10^7} \cdot 5,36 \cdot 10^{-2} \sqrt{1-(5,36 \cdot 10^{-2}/2 \cdot 40 \cdot 10^{-3})^2}} = 0,059 \text{ дБ/м.}$$

Пример 10.5. Для работы в диапазоне частот 3,4—3,9 ГГц выбрать диаметр круглого волновода и определить затухание в нем. Материал волновода — латунь Л-96.

Решение. Рабочему диапазону соответствуют длины волн:

$$\lambda_{кор} = c/f_{max} = 3 \cdot 10^8/3,9 \cdot 10^9 = 0,077 \text{ м} = 7,7 \text{ см;}$$

$$\lambda_{дл} = c/f_{min} = 3 \cdot 10^8/3,4 \cdot 10^9 = 0,088 \text{ м} = 8,8 \text{ см.}$$

Диаметр волновода, допускающий распространение кроме волны  $H_{11}$  еще и волны  $E_{01}$ , определяется условием  $0,765\lambda_{дл} < D < 0,925\lambda_{кор}$ ;  $0,765\lambda_{кор} = 0,765 \cdot 8,8 = 6,7 \text{ см} = 67 \text{ мм}$ ;  $0,925\lambda_{кор} = 0,925 \times 7,7 = 7,1 \text{ см} = 71 \text{ мм}$ .

Стремясь получить наименьшее затухание и допуская возможность распространения волны  $E_{01}$ , из условия  $68 < D < 71$  выберем  $D = 2r = 70 \text{ мм}$ .

Затухание волны  $H_{11}$  на минимальной частоте диапазона 3,4 ГГц [см. (10.28), табл. 10.2]

$$\alpha = \frac{0,793 [0,087(\lambda/r)^2 + 0,43]}{r\sqrt{\sigma\lambda}\sqrt{1-0,087(\lambda/r)^2}} = \frac{0,793 [0,087(88/35)^2 + 0,43]}{30 \cdot 10^{-3} \sqrt{4,07 \cdot 10^7} \cdot 8,8 \cdot 10^{-2} \sqrt{1-0,087(88/35)^2}} = 0,011 \text{ дБ/м.}$$

Пример 10.6. Рассчитать экспоненциальный трансформатор к приемной антенне, работающей в диапазоне частот от 5 до 24 МГц для перехода с сопротивлением 200 на 400 Ом при  $K_{с.к.}$  не менее 0,8.

Решение. Для уменьшения антенного эффекта трансформатор желательно выполнить четырехпроводным перекрещенным (см. рис. 5.2). Размеры сечения концов трансформатора определим, используя (10.13), приняв диаметр провода  $d = 1,5 \text{ мм}$ .

Для  $W = 400 \text{ Ом}$  имеем  $W = 138 \lg(\sqrt{2}D_1/d)$ ;  $\lg(\sqrt{2}D_1/1,5) = W/138 = 400/138 = 2,9$ ;  $\sqrt{2}D_1/1,5 = 794$ ;  $D_1 = 1,5 \cdot 794/\sqrt{2} = 840 \text{ мм}$ . Аналогично для  $W = 200 \text{ Ом}$  получим  $D_1 = 30 \text{ мм}$ .

Расстояние между разнополярными проводами  $D_1$  для высокоомного конца ( $W=400$  Ом) оказывается слишком большим (840 мм). Для уменьшения размеров поперечного сечения трансформатор выполним из двух частей: низкоомную часть (200—250 Ом) выполним четырехпроводной перекрещенной [ТФ4П(200/250), см. рис. 10.2б], высокоомную — четырехпроводной [ТФ4×(250/400), см. рис. 10.2в].

По допустимому ухудшению  $K_{б.в} \geq 0,8$  определим параметр  $A$  (10.34):

$$A = \frac{8\pi}{\lambda_{\max}} \frac{1 - K_{б.в}}{1 + K_{б.в}} = \frac{8 \cdot 3,141 - 0,8}{60 \cdot 1 + 0,8} = 0,0465.$$

Необходимая длина трансформатора (10.35)

$$L_{\text{ТР}} = (2,3/A) \lg(R_1/W_2) = (2,3/0,0465) \lg(400/200) = 15 \text{ м.}$$

Разобьем длину трансформатора, например, на десять секций по 1,5 м для каждой секции определим их волновые сопротивления

$$W_x = W e^{Ax}, \text{ где } x=0; 1,5; 3; \dots, 15 \text{ м.}$$

Расстояния между разнополярными проводами  $D_1$  для первых трех секций определим, используя уравнение (10.13), приняв диаметр проводов  $d=1,5$  мм. Расстояния между однополярными проводами  $D_2$  для последующих секций определим из уравнения (10.9), приняв  $d=1,5$  мм и  $D_1=45$  мм. Расчет трансформаторов сведен в табл. 10.3, эскиз приведен на рис. 10.5.

Таблица 10.3

Расчет экспоненциального трансформатора примера 10.6

$x, \text{ м}$	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15
$W_x, \text{ Ом}$	200	215	231	248	266	285	298	320	344	370	400
$D_1, \text{ мм}$	30	37	49	64/45	45	45	45	45	45	45	45
$D_2, \text{ мм}$	—	—	—	45	37	27	20	14	9	6	2

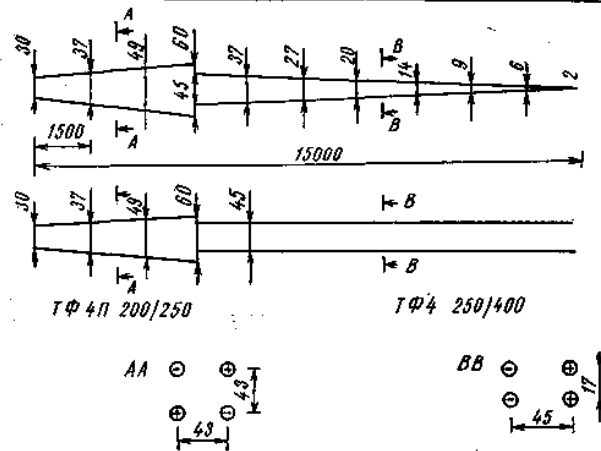


Рис. 10.5 Эскиз экспоненциального трансформатора примера 10.6

Пример 10.7. Для питания панельной антенны требуется рассчитать переход с одной коаксиальной линии на четыре параллельные. Волновые сопро-

тивления входа и каждого из выходов по 75 Ом, средняя длина волны 1,5 м, внутренние диаметры проводников входа 70 мм, выхода 28 мм.

Примем  $W_1=18,75$  Ом,  $W_2=75$  Ом.

Решение. Выходное сопротивление перехода  $75:4=18,75$  Ом.

Для согласования сопротивлений применим четвертьволновый трансформатор. Волновое сопротивление трансформатора (10.29)

$$W_{\text{ТР}} = \sqrt{W_1 W_2} = \sqrt{18,75 \cdot 75} = 37,5 \text{ Ом.}$$

Для расширения рабочей полосы частот применим схему с реактивными отрезками линий (см. рис. 10.4). Волновое сопротивление последовательного разомкнутого отрезка линии (10.32)

$$W_{\text{х.х}} = 0,5(W_2 - W_1) \sqrt{W_2/W_1} = 0,5(75 - 18,75) \sqrt{75/18,75} = 56,25 \text{ Ом.}$$

Волновое сопротивление параллельного короткозамкнутого шлейфа (10.33), подключаемого к выходу.

$$W_{\text{к.з}} = 2W_1 \sqrt{W_1 W_2} / (W_1 - W_2) = 2 \cdot 18,75 \sqrt{18,75 \cdot 75} / (75 - 18,75) = 25 \text{ Ом.}$$

Диаметры перехода определим по (10.14), полагая в нем  $a=0$ ,  $e'=1$  и задав внутренний диаметр внешнего проводника:

$$W = 138 \lg(D/d); \lg(D/d) = W/138;$$

$$\lg(D_2/d_2) = 75/138 = 0,543; D_2/d_2 = 3,5; d_2 = 70/3,5 = 20 \text{ мм;}$$

$$\lg(D_{\text{ТР}}/d_{\text{ТР}}) = 37,5/138 = 0,272; D_{\text{ТР}}/d_{\text{ТР}} = 1,87; d_{\text{ТР}} = 70/1,87 = 37,5 \text{ мм.}$$

Приняв  $D_{\text{х.х}}=36$  мм, имеем  $\lg(D_{\text{х.х}}/d_{\text{х.х}}) = 56,25/138 = 0,407$ ;  $D_{\text{х.х}}/d_{\text{х.х}} = 2,55$ ;  $d_{\text{х.х}} = 36/2,55 = 14$  мм;  $\lg(D_{\text{к.з}}/d_{\text{к.з}}) = 25/138 = 0,18$ ;  $D_{\text{к.з}}/d_{\text{к.з}} = 1,51$ ;  $d_{\text{к.з}} = 70/1,51 = 46,3$  мм.

Длина шлейфов и трансформатора  $L = 0,25\lambda = 0,25 \cdot 1500 = 375$  мм. Эскиз перехода приведен на рис. 10.6

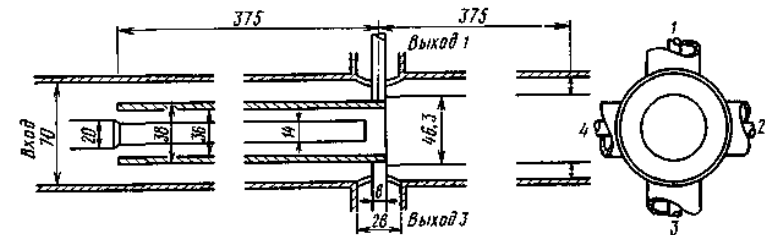


Рис. 10.6 Коаксиальный делитель мощности примера 10.7

Задача 10.1. Заданы: волновое сопротивление фидера, коэффициент бегущей волны в нем, подводимая мощность. Определить эффективное значение напряжения в максимуме на фидере.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W, \text{ Ом}$	50	350	600	240	75	300
$K_{б.в}$	0,85	0,9	0,8	0,9	0,85	0,8
$P, \text{ кВт}$	250	50	150	250	150	100

Задача 10.2. Заданы: частота, волновое сопротивление, диаметр проводов двухпроводного симметричного фидера и его длина. Определить коэффициент полезного действия согласованного фидера, выполненного из медных проводов.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	6	12	10	20	55	26
$W$ , Ом	600	500	600	500	600	500
$d$ , мм	3	4	6	3	4	6
$L$ , м	300	340	250	200	600	300

Задача 10.3. Заданы: частота, волновое сопротивление, диаметр проводов и длина четырехпроводного симметричного фидера. Определить коэффициент полезного действия фидера, выполненного из медных проводов.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	6	10	12	20	55	15
$W$ , Ом	300	300	250	250	300	250
$d$ , мм	3	4	4	6	6	4
$L$ , м	600	400	410	390	540	300

Задача 10.4. Заданы: диаметры внешнего и внутреннего медных проводников коаксиального фидера, толщина диэлектрических шайб  $\Delta$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$  и расстояние между соседними шайбами  $l$ . Определить волновое сопротивление и критическую длину волны коаксиального фидера.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$D$ , мм	21	70	31	79	31	79
$d$ , мм	3,18	17,3	13,5	20	7,75	25
$\Delta$ , мм	6	10	8	10	6	12
$\epsilon'$	5	6	5	6	6	6
$l$ , мм	60	200	100	250	100	200

Задача 10.5. Определить активное сопротивление на единицу длины, обусловленное потерями в металле (меди) коаксиального фидера по данным задачи 10.11, если задана частота.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , МГц	50	200	60	250	200	230

Задача 10.6. Заданы: относительная диэлектрическая проницаемость, внешний и внутренний диаметры проводников коаксиального кабеля. Определить волновое сопротивление, если коэффициент заполнения  $a=1$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\epsilon'$	2,1	1,95	2,08	2,3	2,1	2,0
$D$ , мм	4,6	7,3	7,3	9,0	9,0	4,6
$d$ , мм	1,37	2,28	1,2	1,35	2,7	0,78

Задача 10.7. Определить коэффициент укорочения волны в коаксиальном кабеле по условиям задачи 10.6 (для кабеля  $a=1$ ).

Задача 10.8. Выбрать сечение прямоугольного волновода для работы волной  $H_{10}$  в заданном диапазоне частот.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f_{min}$ , ГГц	3,4	5,67	7,9	10,7	1,7	4,4
$f_{max}$ , ГГц	3,9	6,17	8,4	11,7	2,4	5,0

Задача 10.9. Заданы: частота, сечение волновода. Волновод выполнен из меди и имеет прямоугольное сечение. Определить затухание при работе волной  $H_{10}$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , ГГц	3,75	6	8,1	11,1	2	5
Сечение, мм <sup>2</sup>	72×34	40×20	28,5×12,5	23×10	110×55	48×24

Задача 10.10. Для четырехпроводного фидера (см. рис. 10.26) известны: волновое сопротивление, диаметр проводов, расстояние между проводами, частота. Определить расстояние между однополярными проводами и погонное (на 1 м длины) затухание.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W$ , Ом	350	350	400	380	400	380
$d$ , мм	4	6	6	4	4	6
$D_1$ , мм	300	300	320	320	280	280
$f$ , МГц	20	15	24	25	21,4	23,1

Задача 10.11. Четырехпроводный перекрещенный фидер выполнен из медных проводов диаметром 1,5 мм и расстоянием между проводами 35 мм. Определить КПД согласованного фидера, если известны: длина фидера, частота.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$L$ , мм	300	350	400	540	680	400
$f$ , МГц	20	15	10	6	3,75	10

Задача 10.12. Заданы: волновое сопротивление коаксиального фидера, коэффициент укорочения волны, диаметр внутреннего проводника. Определить диаметр внешнего проводника.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W$ , Ом	75	60	50	75	60	50
$\xi$	1,05	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
$d$ , мм	5	6	7	6	8	10

## ГЛАВА 11

### ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ МЕТРОВЫХ И ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН

#### 11.1. ПАНЕЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Панельные антенны широко применяются для передачи телевидения при работе как с горизонтальной, так и с вертикальной поляризациями. Применение взаимно перпендикулярных поляризаций позволяет ослабить взаимные помехи между станциями, работающими в одном частотном канале. Характеристика направленности панельной антенны с горизонтальной поляризацией в вертикальной плоскости в соответствии с (7.10), (7.11), (8.1), (8.2) и (8.8) определяется уравнением

$$F(\Delta) = F_c(\Delta) F_p(\Delta) = \frac{\sin(0,5 n_s k d_s \sin \Delta)}{\sin(0,5 k d_p \sin \Delta)} \sin(k d_p \cos \Delta), \quad (11.1)$$

где  $n_s$  — число этажей в антенне, которое выбирается в соответствии с табл. 11.1;  $d_p$  — расстояние от вибраторов до аперодического рефлектора выбирается в пределах  $(0,2-0,35)\lambda_{cp}$ ;  $d_s$  — рас-



Таблица 11.1

Коэффициент направленного действия и коэффициент усиления относительно полуволнового вибратора некоторых передающих антенн

Антенна	Турникетная			Панельная							
	2	3	4	2	4	8	10	12	16	24	50
Число этажей											
$D$	3,6	5,6	7,2	1,8	3,7	7,5	9,5	11,0	15,0	22,0	45,0
$D$ , дБ	5,5	7,5	8,5	2,6	5,7	8,7	9,8	10,4	11,7	13,4	16,5
$G$	2,1	3,4	4,4	1,1	2,3	4,6	5,8	7,0	9,2	14,0	27,5
$G$ , дБ	3,4	5,3	6,4	0,4	3,5	6,6	7,6	8,5	9,6	11,5	14,4

стояние между этажами вибраторов выбирается в пределах  $(0,5-1)\lambda_{ср}$ ;  $\Delta$  — угол, отсчитываемый в вертикальной плоскости от нормали к плоскости вибраторов. При  $\Delta=0$   $F_c(\Delta)=n_3$ .

С увеличением расстояния между этажами вибраторов увеличивается КНД антенны, сужается диаграмма направленности, но вместе с этим возрастают уровни боковых лепестков в вертикальной плоскости.

Характеристика направленности панельной антенны с горизонтальной поляризацией в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \sqrt{E_1^2(\varphi) + E_2^2(\varphi) + 2E_1(\varphi)E_2(\varphi)\cos\Delta\Psi}. \quad (11.2)$$

В случае полуволновых вибраторов:

$$E_1(\varphi) = \frac{\cos(0,5\pi \sin\varphi)}{\cos\varphi} \sin(kd_p \cos\varphi); \quad (11.3)$$

$$E_2(\varphi) = \frac{\cos(0,5\pi \cos\varphi)}{\sin\varphi} \sin(kd_p \sin\varphi). \quad (11.4)$$

В случае волновых вибраторов:

$$E_1(\varphi) = \frac{\cos^2(0,5\pi \sin\varphi)}{\cos\varphi} \sin(kd_p \cos\varphi); \quad (11.5)$$

$$E_2(\varphi) = \frac{\cos^2(0,5\pi \cos\varphi)}{\sin\varphi} \sin(kd_p \sin\varphi). \quad (11.6)$$

При синфазном питании

$$\Delta\Psi = kd_\phi(\cos\varphi - \sin\varphi). \quad (11.7)$$

При переменном питании

$$\Delta\Psi = kd_\phi(\cos\varphi - \sin\varphi) + 0,5\pi. \quad (11.8)$$

Здесь  $d_\phi$  — расстояние от фазового центра панели до геометрического центра, вокруг которого расположены панели.

При синфазном питании характеристика направленности антенны в горизонтальной плоскости более равномерна, чем при переменном питании. Антенны с переменным питанием позволяют получить лучшее согласование в более широкой

полосе частот. Увеличение сечения опоры повышает ее жесткость, позволяет разместить антенну с большим числом этажей, т. е. с большим коэффициентом усиления. С увеличением сечения опоры увеличивается расстояние от фазового центра до оси опоры, что приводит к росту неравномерности характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости.

При вертикальной поляризации характеристика направленности в вертикальной плоскости рассчитывается по формуле

$$F(\Delta) = F_1(\Delta)F_p(\Delta)F_c(\Delta), \quad (11.9)$$

где  $F_1(\Delta)$  определяется (7.10) или (7.11);  $F_p(\Delta)$  — уравнением (8.8);  $F_c(\Delta)$  — уравнением (8.13).

Характеристика направленности панельной антенны в горизонтальной плоскости при вертикальной поляризации определяется (11.2), где

$$E_1(\varphi) = \cos(0,5kd_b \sin\varphi) \sin(kd_p \cos\varphi); \quad (11.10)$$

$$E_2(\varphi) = \cos(0,5kd_b \cos\varphi) \sin(kd_p \sin\varphi). \quad (11.11)$$

Здесь  $d_b$  — расстояние между осями вибраторов в панели;  $\Delta\Psi$  определяется (11.7) или (11.8).

Вибраторы панельных антенн выполняют с малым волновым сопротивлением — 150—300 Ом и менее. Для этого диаметры вибраторов берут в пределах 0,05—0,2 и более от длины плеча вибратора. Размеры панели (рефлектора) с полуволновыми вибраторами в плоскости  $E$   $L_{PE} \geq 0,6\lambda_{ср}$  и в плоскости  $H$   $L_{PH} \geq 0,8\lambda_{ср}$ .

Полосы частот, занимаемые телевизионными каналами, приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Полосы частот, занимаемые телевизионными каналами

Диапазон	Канал	Полоса частот, МГц	Диапазон	Канал	Полоса частот, МГц
1	1	48,5 — 56,5	3	11	214 — 222
1	2	58,0 — 66,0	3	12	222 — 230
2	3	76,0 — 84,0	4	21	470 — 478
2	4	87,0 — 92,0	4	30	542 — 550
2	5	92,0 — 100	4	40	622 — 630
3	6	174 — 182	5	41	630 — 638
3	7	182 — 190	5	50	702 — 710
3	8	190 — 198	5	60	782 — 790
3	9	198 — 206	5	65	822 — 830
3	10	206 — 214	5	69	854 — 862

## 11.2. СПИРАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Спиральные антенны позволяют получить эллиптическую поляризацию, близкую к круговой. Круговая поляризация часто применяется в системах связи через искусственные спутники Земли. При приеме телевизионных программ в условиях крупных

городов, за счет отраженных волн может существенно ухудшиться качество изображения, особенно при приеме цветных программ. Использование для передачи телевизионных программ в этих условиях круговой поляризации (например, в диапазонах дециметровых волн) позволит существенно ослабить прием отраженных волн. При отражении волн направление вращения поляризации отраженной волны изменяется на обратное и приемной антенной с круговой поляризацией приниматься не будет.

Осевая длина спиральной антенны определяется заданными КПД и длиной волны:

$$L = (0,125 \div 0,13) D \lambda \quad (11.12)$$

Длина витка спирали

$$l = \lambda_{\text{ср}} = \sqrt{\lambda_{\text{min}} \lambda_{\text{max}}} \quad (11.13)$$

Шаг спирали, необходимый для получения круговой поляризации,

$$S = 0,22 \lambda_{\text{ср}} \quad (11.14)$$

Угол спирали определяется из уравнения

$$\sin \alpha = S/l \quad (11.15)$$

Радиус спирали

$$R = (l/2\pi) \cos \alpha \quad (11.16)$$

Число витков (с округлением до целого)

$$n = L/S \quad (11.17)$$

Диаметр экрана спиральной антенны

$$D_э \geq (0,6 \div 0,7) \lambda_{\text{ср}} \quad (11.18)$$

Диаметр проводника спирали

$$d = (0,03 \div 0,05) \lambda_{\text{ср}} \quad (11.19)$$

Коэффициент укорочения волны в спиральной антенне

$$\xi = \frac{1}{1 - (\lambda S/1,22 \pi)} \quad (11.20)$$

Характеристика направленности спиральной антенны рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \cos \varphi \frac{\sin [0,5 n k S (\xi - \cos \varphi)]}{\sin [0,5 k S (\xi - \cos \varphi)]} \quad (11.21)$$

В том случае, когда длина спиральной антенны оказывается слишком большой, антенну выполняют из нескольких спиралей соответственно меньшей длины. Спирали в пространстве необходимо разнести так, чтобы их эффективные площади не перекрывались. С этой целью расстояния между центрами спиралей должны удовлетворять условию

$$d_0 \geq \sqrt{L \lambda} \quad (11.22)$$

### 11.3. СИСТЕМЫ КОЛЛЕКТИВНОГО ПРИЕМА ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Для систем коллективного приема телевидения разработаны АТВК $m/n$  — антенны телевизионные типа волновой канал с  $m$  элементов на  $n$ -й канал. Затухания, вносимые некоторыми типами кабелей на средних частотах телевизионных каналов, приведены в табл. 11.3. Параметры антенн и некоторых элементов системы приведены в табл. 11.4. Для увеличения коэффициента

Таблица 11.3

Затухание, вносимое кабелем на средней частоте телевизионного канала, дБ/м

Номер канала	Тип кабеля							
	РК-75-4-11 РК-75-4-15	РК-75-4-12	РК-75-4-16	РК-75-7-11 РК-75-7-15	РК-75-9-12	РК-75-9-13	РК-75-13-16	РК-75-24-15
1	0,072	0,064	0,068	0,048	0,042	0,042	0,1	0,056
2	0,079	0,073	0,079	0,053	0,046	0,046	0,115	0,067
3	0,090	0,090	0,094	0,060	0,053	0,052	0,135	0,092
4	0,094	0,096	0,100	0,063	0,056	0,055	0,15	0,1
5	0,098	0,103	0,107	0,066	0,061	0,058	0,16	0,11
6	0,135	0,160	0,171	0,093	0,092	0,088	0,25	0,18
7	0,139	0,165	0,177	0,095	0,095	0,090	0,26	0,19
8	0,143	0,171	0,183	0,098	0,098	0,093	0,27	0,20
9	0,146	0,176	0,189	0,100	0,100	0,095	0,27	0,20
10	0,150	0,181	0,195	0,103	0,105	0,097	0,28	0,21
11	0,151	0,186	0,199	0,106	0,108	0,100	0,29	0,22
12	0,154	0,190	0,204	0,108	0,112	0,102	0,3	0,23

Примечание. Максимальная мощность, передаваемая по кабелю РК 75—24—15 во диапазоне: 1—1,2; 2—0,9; 3—0,5 кВт.

Таблица 11.4

Параметры некоторых элементов системы коллективного приема телевидения

Номер канала	Распределительная коробка КРТ-6		Потери, вносимые фильтром сложения в полосе		Действующая длина антенны, м		
	Вносимые потери, дБ	Коэффициент передачи абоненту, дБ	пропускания, дБ	задержки, дБ	ТВК-3/№	ТВК-4/№	ТВК-5/№
1	0,1	-25	0,2	45	3,54	4,4	5,1
2	0,1	-23	0,25	34	3,02	3,88	4,3
3	0,15	-22	0,25	27	2,26	2,82	3,26
4	0,25	-21	0,55	21	2,06	2,56	3,96
5	0,3	-20	0,2	26	1,87	2,34	2,70
6	0,5	-17	0,1	26	1,01	1,26	1,46
7	0,5	-17	0,1	26	0,97	1,21	1,4
8	0,55	-17	0,4	26	0,93	1,16	1,34
9	0,55	-17	0,1	27	0,88	1,11	1,28
10	0,55	-17	0,41	28	0,86	1,08	1,24
11	0,5	-17,5	0,45	28	0,81	1,02	1,18
12	0,5	-18	0,25	26	0,79	0,99	1,14

усиления на 3 дБ применяют систему, состоящую из двух АТВК. В такой системе полотна разносятся обычно по высоте на расстояние, равное длине волны или удовлетворяющее условию (11.22). Система из двух АТВК позволяет значительно повысить коэффициент защитного действия. Это достигается сдвигом одного полотна относительно другого в направлении главного приема на расстояние  $d_r = 0,25\lambda$ . Длину кабеля от выдвинутого вперед полотна до точки подключения его к главному фидеру берут на  $0,25\lambda_{\text{каб}}$  длиннее, чем от полотна смещенного назад.

Характеристика направленности системы из двух смещенных полотен в вертикальной плоскости будет определяться уравнением

$$F(\Delta) = F_1(\Delta) \cdot 2 \cos[0,5k(d_r \cos \Delta + d_b \sin \Delta) - 0,5\Phi], \quad (11.23)$$

в горизонтальной плоскости — уравнением

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \cdot 2 \cos(0,5kd_r \cos \varphi - 0,5\Phi), \quad (11.24)$$

где  $F_1(\Delta)$  и  $F_1(\varphi)$  — множители характеристик направленности одной АТВК соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  $d_r = 0,25\lambda$  — сдвиг между полотнами АТВК в направлении главного приема;  $d_b$  — расстояние между полотнами по высоте;  $\Phi$  — сдвиг по фазе между токами в полотнах, обусловленный разными длинами распределительных линий.

В случае, когда горизонтальный сдвиг между полотнами в направлении главного приема  $d_r = 0,25\lambda$  и  $\Phi = 90^\circ$ , уравнения (11.23) и (11.24) принимают вид:

$$F(\Delta) = F_1(\Delta) \cdot 2 \cos[0,5kd_b \sin \Delta - 0,25\pi(1 - \cos \Delta)]; \quad (11.25)$$

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \cdot 2 \cos[0,25\pi(1 - \cos \varphi)]. \quad (11.26)$$

Для обеспечения  $\Phi = 90^\circ$  необходимо, чтобы разница в длинах распределительных линий, питающих оба полотна, была равна  $0,25\lambda/\xi$ , где  $\xi$  — коэффициент укорочения волны в распределительных линиях.

Пример 11.1. Выбрать основные размеры панели из двух полуволновых вибраторов с аperiодическим рефлектором для работы в диапазоне 470—510 МГц при питании коаксиальным фидером с волновым сопротивлением 75 Ом. Определить значения тока и напряжения на вибраторах при подводимой к панели мощности 600 Вт.

Решение. Средние частота и длина волны:

$$f_{\text{ср}} = \sqrt{f_{\text{min}} f_{\text{max}}} = \sqrt{470 \cdot 510} = 490 \text{ МГц};$$

$$\lambda_{\text{ср}} = c/f_{\text{ср}} = 3 \cdot 10^8 / 490 \cdot 10^6 = 0,61 \text{ м} = 610 \text{ мм}.$$

Вибраторы выполним из полосовой стали сечением  $10 \times 60 \text{ мм}^2$ . Расстояние между вибраторами  $d_b = 0,5\lambda_{\text{ср}} = 0,5 \cdot 610 = 305 \text{ мм}$ .

Расстояние между вибраторами и рефлектором

$$d_r = 0,2\lambda_{\text{ср}} = 0,2 \cdot 610 = 122 \text{ мм}.$$

Волновое сопротивление вибраторов определим по (7.18), приняв за эквивалентный радиус одну четвертую часть ширины сечения вибратора  $r = W/4 = 60/4 = 15 \text{ мм}$ :

$$W_b = 276 \lg(d/r) - 120 = 276 \lg(0,25 \cdot 610/15) - 120 = 156 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление полуволновых вибраторов панели (см. пример 8.7)  $Z_b = 79,4 + i31,5 \text{ Ом}$ . Для компенсации реактивной составляющей  $X_b = 31,5 \text{ Ом}$  определим необходимое укорочение плеч вибратора по (7.26):

$$\Delta l/l = 2X_b/\pi W = 2 \cdot 31,5/3,14 \cdot 156 = 0,13;$$

$$\Delta l = 0,13 \cdot 0,25\lambda_{\text{ср}} = 0,13 \cdot 0,25 \cdot 610 = 20 \text{ мм}.$$

Конструктивная длина плеча вибратора

$$l = 0,25\lambda_{\text{ср}} - \Delta l = 0,25 \cdot 610 - 20 = 132 \text{ мм}.$$

Для согласования вибраторов с фидером входное сопротивление каждого вибратора должно быть равно:  $2W_\Phi = 150 \text{ Ом}$  (вибраторы соединены параллельно). Вибраторы закрепим на четырехпроводной линии с волновым сопротивлением 150 Ом. Примем из механических соображений, диаметр проводов  $d = 5 \text{ мм}$  и расстояние между однополярными проводами  $D_2 = d + \Delta = 5 + 10 = 15 \text{ мм}$ , где  $\Delta$  — толщина пластин вибратора.

Расстояние между разнополярными проводами  $D_1$  определим из (10.9). Решая (10.9) относительно  $D_1$ , получим

$$W = 138 \lg \frac{2D_1 \sqrt{D_1^2 + D_2^2}}{d D_2};$$

$$D_1 = \sqrt{D_2/2} \sqrt{\sqrt{D_2^2 + X^2 d^2} - D_2},$$

где  $X$  определяется из уравнения  $\lg X = W/138$ . В данном случае  $\lg X = 150/138 = 1,086$  и  $X = 12,2$ ;

$$D_1 = \sqrt{15/2} \sqrt{\sqrt{15^2 + 12,2^2} - 15} = 19 \text{ мм}.$$

Расстояние от вибратора до короткозамыкающего мостика  $l_{\text{ш}}$  найдем исходя из необходимости повышения сопротивления нагрузки от  $R_b = 79,4 \text{ Ом}$  до  $R_{\text{вх}} = 150 \text{ Ом}$  из уравнения

$$R_b = R_{\text{вх}} \sin^2 kl_{\text{ш}}.$$

Решая это уравнение относительно  $l_{\text{ш}}$ , имеем:

$$\sin kl_{\text{ш}} = \sqrt{R_b/R_{\text{вх}}} = \sqrt{79,4/150} = 0,73; \quad kl_{\text{ш}} = 36^\circ;$$

$$l_{\text{ш}} = kl_{\text{ш}}/k = 36\lambda/360 = 0,061 \text{ м} = 61 \text{ мм}.$$

Определим размеры рефлектора в плоскостях  $E$  и  $H$ :

$$L_{\text{PE}} = 0,6\lambda_{\text{ср}} = 0,6 \cdot 610 = 366 \text{ мм}; \quad L_{\text{PH}} = 0,8\lambda_{\text{ср}} = 0,8 \cdot 610 = 488 \text{ мм}.$$

Эскиз панели приведен на рис. 11.1. Панель имеет два вибратора. Мощность, приходящаяся на один вибратор,  $600:2 = 300 \text{ Вт}$ .

Эффективное значение тока влучности вибратора

$$I_{\text{п}} = \sqrt{P_1/R_{\Sigma \text{ п}}} = \sqrt{300/79,4} = 1,94 \text{ А}.$$

Эффективное значение напряжения на концах вибраторов  
 $U_{\text{н}} = I_{\text{н}} W_{\text{в}} = 1,94 \cdot 156 = 300 \text{ В.}$

Пример 11.2. Определить основные размеры панели с двумя волновыми вибраторами для работы в диапазоне 214—230 МГц. Сопротивление излучения волнового вибратора в панели, отнесен-

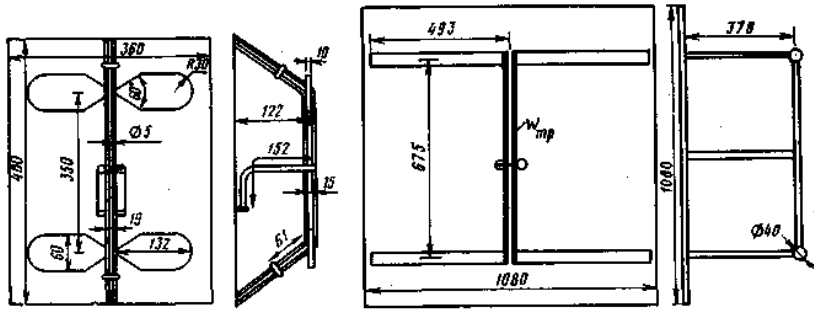


Рис. 11.1. Панель с полуволновыми вибраторами примера 11.1

Рис. 11.2. Панель с волновыми вибраторами примера 11.2

ное к лучности тока, равно 280 Ом (см. пример 8.8), волновое сопротивление фидера  $W_{\text{ф}} = 75 \text{ Ом.}$

Решение. Средние частота и длина волны:

$$f_{\text{ср}} = \sqrt{f_{\text{min}} f_{\text{max}}} = \sqrt{214 \cdot 230} = 222 \text{ МГц; } \lambda_{\text{ср}} = c/f_{\text{ср}} = 3 \cdot 10^8 / 222 \cdot 10^6 = 1,35 \text{ м.}$$

Размеры аперидического рефлектора в плоскостях  $H$  и  $E$ :

$$L_{\text{рн}} \geq 0,8 \lambda_{\text{ср}} = 0,8 \cdot 1350 = 1080 \text{ мм; } L_{\text{рв}} \geq 0,8 \lambda_{\text{ср}} = 0,8 \cdot 1350 = 1080 \text{ мм.}$$

Расстояние от вибраторов до аперидического рефлектора  
 $d_{\text{р}} = (0,2 - 0,35) \lambda_{\text{ср}} = 0,28 \cdot 1350 = 378 \text{ мм.}$

Диаметр и радиус вибратора:

$$d = 2r = (0,05 \div 0,2) 0,5 \lambda_{\text{ср}} = 0,06 \cdot 0,5 \cdot 1350 = 40 \text{ мм; } r = 20 \text{ мм.}$$

Коэффициент укорочения волны в вибраторе находим по кривым рис. 7.1. Для  $l/r \approx 0,5 \lambda_{\text{ср}} / 20 = 33,2$ ;  $\xi = 1,37$ .

Длина плеча волнового вибратора

$$l = 0,5 \lambda_{\text{ср}} / \xi = 0,5 \cdot 1350 / 1,37 = 493 \text{ мм.}$$

Волновое сопротивление вибраторов (7.19)

$$W_{\text{в}} = 276 \lg(\lambda / \pi r) - 68 = 276 \lg(1350 / 3,14 \cdot 20) - 68 = 300 \text{ Ом.}$$

Входное сопротивление вибратора (7.24)

$$R_{\text{вх}} = W_{\text{в}}^2 / R_{\Sigma \text{н}} = 300^2 / 280 = 320 \text{ Ом.}$$

Панель имеет два параллельно соединенных вибратора, следовательно, входное сопротивление каждого вибратора должно быть

$2W_{\text{ф}} = 150 \text{ Ом.}$  Соединительные линии от каждого вибратора до симметрирующего устройства используем как четвертьволновые трансформаторы. Их волновые сопротивления (10.25)

$$W_{\text{тр}} = \sqrt{R_{\text{вх}} 2W_{\text{ф}}} = \sqrt{320 \cdot 2 \cdot 75} = 220 \text{ Ом.}$$

Расстояния между вибраторами (их осями)

$$d = 0,5 \lambda_{\text{ср}} = 0,5 \cdot 1350 = 675 \text{ мм.}$$

Эскиз панели приведен на рис. 11.2.

Пример 11.3. Определить основные размеры панельной антенны для передачи телевизионного вещания в диапазоне 470—510 МГц, рассчитать ее характеристики направленности. Антенна должна иметь горизонтальную поляризацию с коэффициентом усиления относительно полуволнового вибратора не менее 9.

Решение. Необходимое число этажей определим по табл. 11.1. Значению  $G = 9$  соответствует  $n_s = 16$ . Если принять за конструктивный элемент антенны панель из двух полуволновых вибраторов, потребуется с каждой стороны четырехгранной опоры по высоте установить по восемь панелей. Всего антенна будет иметь 32 панели.

Размеры панелей определены в примере 11.1:  $d_{\text{р}} = 122 \text{ мм}$ ;  $d_s = 305 \text{ мм}$ . Расстояние от фазового центра панели до вертикальной оси опоры

$$d_{\text{ф}} = 0,5 d_{\text{р}} + 0,5 L_{\text{рв}} + (50 \div 100) = 0,5 \cdot 122 + 0,5 \cdot 366 + 56 = 300 \text{ мм.}$$

Характеристика направленности антенны в вертикальной плоскости рассчитаем по (11.1), направления «нулевых» излучений определим, используя (8.15):

$$F(\Delta) = F_{\text{с}}(\Delta) F_{\text{р}}(\Delta) = \frac{\sin(0,5 n_s k d_s \sin \Delta)}{\sin(0,5 k d_s \sin \Delta)} \sin(k d_{\text{р}} \cos \Delta);$$

$$\sin \Delta_0 = M \lambda_{\text{ср}} / n_s d_s, \text{ где } M = 1, 2, 3, \dots; \Delta_0 = 7,16; 14,5; 22; 30; 38,6; 61,1 \text{ и } 90^\circ; 0,5 k d_s = 0,5 \cdot 360 \cdot 305 / 610 = 90^\circ; 0,5 n_s k d_s = 1440^\circ; k d_{\text{р}} = 360 \cdot 122 / 610 = 72^\circ.$$

Расчет характеристики направленности в вертикальной плоскости приведен в виде табл. 11.5, где  $X = 0,5 k d_s \sin \Delta$ .

Характеристика направленности антенны в горизонтальной плоскости рассчитана по (11.2), (11.3), (11.4) и (11.7):

$$F(\varphi) = \sqrt{E_1^2(\varphi) + E_2^2(\varphi) + 2E_1(\varphi)E_2(\varphi) \cos \Delta \Psi};$$

$$E_1(\varphi) = F_1(\varphi) F_{\text{р1}}(\varphi) = \frac{\cos(0,5 \pi \sin \varphi)}{\cos \varphi} \sin(k d_{\text{р}} \cos \varphi);$$

$$E_2(\varphi) = F_2(\varphi) F_{\text{р2}}(\varphi) = \frac{\cos(0,5 \pi \cos \varphi)}{\sin \varphi} \sin(k d_{\text{р}} \sin \varphi);$$

$$\Delta \Psi = k d_{\text{ф}} (\cos \varphi - \sin \varphi); k d_{\text{ф}} = 360 \cdot 300 / 610 = 177^\circ.$$

Расчет характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости сведен в табл. 11.6.

Таблица 11.5

Расчет характеристики направленности в вертикальной плоскости антенны примера 11.3

$\Delta^\circ$	$n_p X$	$X^\circ$	$\sin n_p X$	$\sin X$	$F_c(\Delta)$	$F_p(\Delta)$	$F(\Delta)$	$F_R(\Delta)$
0	0	0	0	0	16	0,95	15,2	1
2	50	3,14	0,766	0,054	14,2	0,95	13,5	0,89
4	100	6,30	0,985	0,109	9,04	0,95	8,6	0,56
6	151	9,40	0,485	0,163	2,98	0,94	2,8	0,18
7,16	180	11,2	0	0,194	0	0,94	0	0
10	250	15,6	-0,94	0,269	-3,49	0,94	-3,3	-0,22
12	300	18,7	-0,866	0,322	-2,69	0,94	-2,5	-0,16
14,5	360	0	0,384	0	0	0,94	0	0

Таблица 11.6

Расчет характеристики направленности в горизонтальной плоскости антенны примера 11.3

$\varphi^\circ$	$F_1(\varphi)$	$F_p(\varphi)$	$E_1(\varphi)$	$E_2(\varphi)$	$\Delta\varphi$	$\cos \Delta\varphi$	$F(\varphi)$	$F_H(\varphi)$
0	1	0,95	0,95	0	177	-1	0,95	0,92
15	0,95	0,94	0,89	0,06	125	-0,57	0,86	0,83
30	0,82	0,89	0,73	0,25	65	0,26	0,79	0,77
45	0,62	0,78	0,49	0,49	0	1	0,97	1

Эскиз антенны приведен на рис. 11.3. Характеристики направленности изображены на рис. 11.4.

Пример 11.4. Определить основные размеры панельной антенны с волновыми вибраторами для работы с вертикальной поляризацией, рассчитать характеристики направленности. Антенна должна иметь коэффициент усиления относительно полуволнового вибратора не менее 4,5 при работе на частоте 200 МГц.

Решение. Длина волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 200 \cdot 10^6 = 1,5$  м.

В качестве конструктивного элемента примем панель, состоящую из двух волновых вибраторов с аperiодическим рефлектором (см. пример 8.8). Расстояние между вибраторами в панели  $d_B = 0,5\lambda = 0,5 \cdot 1,5 = 0,75$  м.

Расстояние от вибраторов до аperiодического рефлектора  $d_p = (0,2 \div 0,35) \lambda = 0,28 \cdot 1,5 = 0,42$  м.

Размеры рефлектора в плоскостях  $H$  и  $E$  соответственно:

$$L_{pH} = (0,8 \div 1) \lambda = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ мм};$$

$$L_{pE} = (0,8 \div 1) \lambda = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ мм}.$$

Расстояние от фазового центра панели до оси опоры

$$d_\Phi = 0,5d_p + 0,5L_{pH} + (50 \div 100) = 0,5 \cdot 420 + 0,5 \cdot 1350 + 65 = 950 \text{ мм}.$$

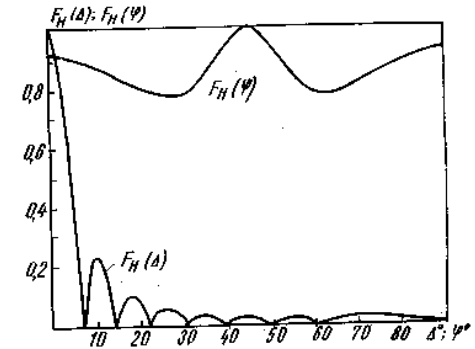
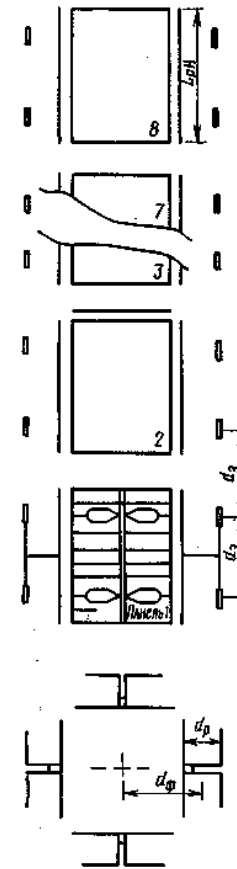


Рис. 11.4. Диаграмма направленности панельной антенны примера 11.3

Рис. 11.3. Панельная антенна с горизонтальной поляризацией примера 11.3

В соответствии с табл. 11.1 для  $G = 4,5$  антенна должна иметь восемь этажей, по четыре панели по высоте с каждой стороны опоры. Всего антенна должна иметь 16 панелей.

Расстояние между центрами панелей по высоте

$$d_{п} = (1 \div 1,5) \lambda = 1 \cdot 1500 = 1500 \text{ мм}.$$

Характеристика направленности в вертикальной плоскости при вертикальном расположении вибраторов (задана вертикальная поляризация) в соответствии с (7.11), (8.13) и (8.9)

$$F(\Delta) = F_1(\Delta) F_c(\Delta) F_p(\Delta) = \frac{\cos^2(0,5 \pi \sin \Delta)}{\cos \Delta} \frac{\sin(0,5 n_{п} k d_{п} \sin \Delta)}{\sin(0,5 k d_{п} \sin \Delta)} \times$$

$$\sin(k d_p \cos \Delta);$$

$$0,5 k d_{п} = 0,5 \cdot 360 \cdot 1,5 / 1,5 = 180^\circ; \quad 0,5 n_{п} k d_{п} = 720^\circ;$$

$$k d_p = 2 \pi d_p / \lambda = 2 \cdot 180 \cdot 0,42 / 1,5 = 100^\circ.$$

Углы, соответствующие нулевому излучению (8.15),  $\Delta_0 = 1, 2, 3, \dots, \lambda / n_{п} d_{п}$ ;  $\Delta_0 = 14,5; 30; 48,6$  и  $90^\circ$ .

Интервалы углов для расчета характеристики направленности в вертикальной плоскости в области основного лепестка прием равными  $14,5 / (5 \div 6) = 3^\circ$ . Расчет характеристики направленности в вертикальной плоскости сведен в табл. 11.7, где  $X = 0,5 k d_{п} \sin \Delta$ , и представлен на рис. 11.6.

Таблица 11.7

Расчет характеристики направленности в вертикальной плоскости панельной антенны с вертикальной поляризацией по условиям примера 11.4

$\Delta^\circ$	$F_1(\Delta)$	$F_p(\Delta)$	$X$	$n_{II} X$	$\sin X$	$\sin n_{II} X$	$F_c(\Delta)$	$F(\Delta)$	$F_H(\Delta)$
0	1	0,98	0	0	0	0	4	3,92	1
3	0,99	0,98	9,4	37,7	0,16	0,61	3,73	3,64	0,93
6	0,98	0,98	18,8	75	0,32	0,96	3	2,88	0,74
9	0,95	0,98	28,2	113	0,47	0,92	1,95	1,82	0,47
12	0,93	0,98	37,4	150	0,61	0,5	0,82	0,75	0,19
14,5	0,89	0,99	45	180	0,71	0	0	0	0
20	0,79	0,99	61,5	246	0,88	-0,91	-1,04	-0,91	-0,23
30	0,58	0,99	90	360	1	0	0	0	0
40	0,38	0,97	115	463	0,9	0,97	1,07	0,39	0,1
48,6	0,23	0,94	135	540	0,71	0	0	0	0
60	0,09	0,9	156	625	0,41	-0,99	-2,3	-0,19	-0,04
90	0	0	180	720	0	0	4	0	0

Примечание. Здесь  $X=0,5kd_p \sin \Delta$ .

Характеристика направленности панельной антенны в горизонтальной плоскости при вертикальной поляризации и синфазном питании панелей в соответствии с (11.2), (11.7), (11.10) и (11.11) рассчитаем по следующим формулам:

$$F(\varphi) = \sqrt{E_1^2(\varphi) + E_2^2(\varphi) + 2E_1(\varphi)E_2(\varphi)\cos \Delta\psi};$$

$$E_1(\varphi) = F_1(\varphi)F_{p1}(\varphi) = \cos(0,5kd_p \sin \varphi) \sin(kd_p \cos \varphi);$$

$$E_2(\varphi) = F_2(\varphi)F_{p2}(\varphi) = \cos(0,5kd_p \cos \varphi) \sin(kd_p \sin \varphi);$$

$$\Delta\psi = kd_\phi(\cos \varphi - \sin \varphi); \quad 0,5kd_p = 0,5 \cdot 2 \cdot 180 \cdot 0,75/1,5 = 90^\circ;$$

$$kd_p = 100^\circ; \quad kd_\phi = 228^\circ.$$

Расчет характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости сведен в табл. 11.8. Эскиз антенны приведен на рис. 11.5. Характеристика направленности в горизонтальной плоскости изображена на рис. 11.6.

Таблица 11.8

Расчет характеристики направленности в горизонтальной плоскости панельной антенны с вертикальной поляризацией по условиям примера 11.4

$\varphi^\circ$	$F_1(\varphi)$	$F_{p1}(\varphi)$	$E_1(\varphi)$	$E_2(\varphi)$	$\Delta\psi$	$\cos \Delta\psi$	$F(\varphi)$	$F_H(\varphi)$
0	1	0,98	0,98	0,00	228	0,669	0,98	1
15	0,92	0,99	0,91	0,03	161	-0,945	0,88	0,89
25	0,79	1	0,79	0,1	110	-0,342	0,75	0,76
30	0,71	0,99	0,70	0,16	83,5	0,113	0,73	0,74
35	0,62	0,99	0,62	0,23	56	0,559	0,77	0,78
40	0,53	0,97	0,52	0,32	28	0,883	0,82	0,83
45	0,44	0,94	0,42	0,42	0	1	0,86	0,87

Пример 11.5. Система коллективного приема телевидения (рис. 11.7) состоит из антенн АТВК-3/2 и АТВК-5/8 соответственно для приема по второму и восьмому каналам, фильтра сложе-

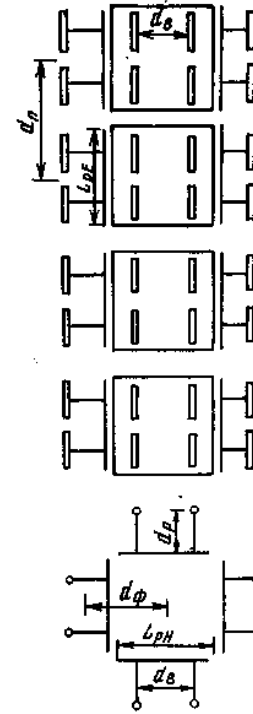


Рис. 11.5. Панельная антенна с вертикальной поляризацией примера 11.4

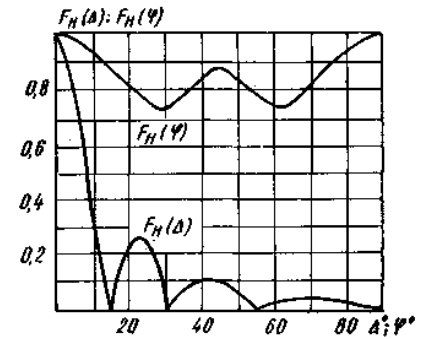


Рис. 11.6. Диаграмма направленности панельной антенны примера 11.4

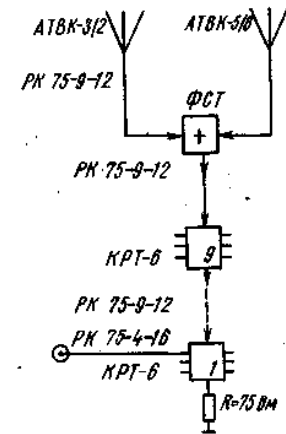


Рис. 11.7. Система коллективного приема телевидения примера 11.5

ния ФСТ, распределительных коробок КРТ-6. Магистральная сеть выполнена кабелем РК 75—9—12, а абонентские отводы кабелем РК 75—4—16. Напряженность поля на частоте второго канала  $E_2=10$  мВ/м, на частоте восьмого канала  $E_8=25$  мВ/м. Определить напряжения на входах телевизионных приемников, расположенных на первых этажах, если магистральная сеть имеет длину 40 м, а абонентские кабели по 20 м.

Решение. Суммарные потери в системе коллективного приема, обусловленные фильтром сложения, распределительными коробками, магистральными и абонентскими кабелями, при приеме по

второму каналу в соответствии с табл. 11.3 и 11.4 будут  $0,25 + 0,1 \cdot 9 + 23 + 0,046 \cdot 40 + 0,079 \cdot 20 = 27,56$  дБ.

Затуханию 27,57 дБ соответствует ослабление по напряжению в 24,4 раза:

$$X = 20 \lg X; \lg X = X/20 = 27,57/20 = 1,378; X = 24,4.$$

Напряжение на входе магистрального кабеля (выходе антенны)

$$U_{вх2} = 0,5 L_{д2} E_2 = 0,5 \cdot 3,02 \cdot 10 = 15,1 \text{ мВ.}$$

Напряжения на входах телевизионных приемников

$$U_{пр2} = 15,1/24,4 = 0,62 \text{ мВ.}$$

При приеме по восьмому каналу суммарные потери равны  $0,4 + 0,55 \cdot 9 + 17 + 0,095 \cdot 40 + 0,183 \cdot 20 = 29,78$  дБ.

Затуханию 29,78 дБ соответствует ослабление по напряжению в 31 раз. Напряжения на входе магистрального кабеля и на входе приемника соответственно будут:

$$U_{вх8} = 0,5 L_{д8} E_8 = 0,5 \cdot 1,34 \cdot 25 = 16,7 \text{ мВ;}$$

$$U_{пр8} = 16,7/31 = 0,54 \text{ мВ.}$$

Пример 11.6. Определить основные размеры спиральной антенны для работы на волне 42 см при  $D=15$ . Рассчитать характеристику направленности.

Решение. Осевая длина спирали в соответствии с (11.12)

$$L = (0,125 \div 0,13) D \lambda_{ср} = 0,127 \cdot 15 \cdot 42 = 80 \text{ см.}$$

Длина витка спирали (11.13)  $l = \lambda_{ср} = 420 \text{ мм.}$

Шаг спирали (11.14)  $S = 0,22 \lambda_{ср} = 0,22 \cdot 420 = 92,5 \text{ мм.}$

Угол спирали (11.15)  $\sin \alpha = S/l = 92,5/420 = 0,22; \alpha = 12^\circ 40'.$

Радиус спирали определим по формуле (11.15):

$$R = (l/2\pi) \cos \alpha = (42/6,28) \cos 14^\circ 40' = 65,5 \text{ мм.}$$

Число витков спирали (11.17) с округлением до целого

$$n \approx L/S = 800/92,5 \approx 9.$$

Диаметр экрана спиральной антенны (11.18)

$$D_0 \geq (0,6 \div 0,7) \lambda_{ср} = 0,666 \cdot 420 = 280 \text{ мм.}$$

Диаметр проводника спирали (11.19)

$$d = (0,03 \div 0,05) \lambda_{ср} = 0,038 \cdot 420 = 16 \text{ мм.}$$

Коэффициент укорочения волны в спиральной антенне (11.20)

$$\xi = \frac{1}{1 - (\lambda S/1,2\pi l)^2} = \frac{1}{1 - (420 \cdot 92,5/1,22 \cdot 420)^2} = 1,22.$$

Диапазон рабочих волн спиральной антенны

$$\lambda_{раб} = (0,75 \div 1,3) \lambda_{ср} = (0,75 \div 1,3) 42 = (31,5 - 55) \text{ см.}$$

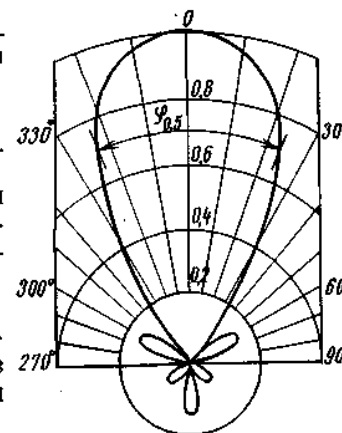
Расчет характеристики направленности выполнен по (11.21) и сведен в табл. 11.9, построение характеристики направленности приведено на рис. 11.8.

Таблица 11.9  
Расчет характеристики направленности спиральной антенны по условиям примера 11.6

$\varphi^\circ$	$\cos \varphi$	$\xi - \cos \varphi$	$nX$	$X$	$\sin nX$	$\sin X$	$F_c(\varphi)$	$F_H(\varphi)$
0	1,00	0,22	78	8,7	0,98	0,152	6,45	1
10	0,98	0,23	84	9,3	0,99	0,162	6,20	0,96
20	0,94	0,26	92	10,3	1	0,179	5,27	0,81
30	0,87	0,36	128	14,2	0,79	0,245	2,78	0,43
40	0,77	0,46	164	18,2	0,28	0,314	0,67	0,10
50	0,64	0,58	207	23	-0,45	0,390	-0,74	-0,11
60	0,5	0,72	257	28,5	-0,97	0,476	-1,02	-0,16
70	0,34	0,88	314	34,8	-0,72	0,570	-0,43	-0,07
80	0,17	1,15	410	45,5	0,77	0,714	0,19	0,03
90	0	1,22	434	48,2	0,96	0,745	0	0
120	-0,5	1,72	612	68,0	0,95	-0,925	0,52	0,08
180	-1	2,22	790	88,0	0,94	1	0,94	0,14

Примечание. Здесь  $X = 0,5\lambda S(\xi - \cos \varphi)$ .

Рис. 11.8. Диаграмма направленности спиральной антенны примера 11.6



По полученной ширине диаграммы направленности (по уровню половинной мощности)  $\varphi_{0,5} = 46^\circ$  проверим значение КНД:  $D \approx 33\,000 / (\varphi_{0,5}^2) = 33\,000 / 46 = 15,5$ .

Задача 11.1. Определить основные размеры панели, состоящей из двух полуволновых вибраторов, если известна полоса рабочих частот.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\Delta f$ , МГц	442—502	542—582	582—622	622—662	662—710	710—750

Задача 11.2. Определить основные размеры панели, состоящей из двух волновых вибраторов, если известна полоса рабочих частот.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$\Delta f$ , МГц	174—182	182—190	190—198	198—206	206—214	214—222

Задача 11.3. Панельная антенна синфазного питания с горизонтальной поляризацией состоит из полуволновых вибраторов. Известны: расстояние от вибраторов до аperiodического рефлектора  $d_p$ , расстояние от фазового центра панели до оси опоры  $d_\phi$ , длина волны. Рассчитать характеристику направленности в горизонтальной плоскости (плоскости  $E$ ).

Вариант	а	б	в	г	д	е
$d_p$ , мм	1400	1200	850	775	370	350
$d_\phi$ , мм	4000	3400	2400	2200	980	980
$\lambda$ , м	5,70	4,84	3,41	3,12	1,48	1,43

Задача 11.4. В панельной антенне с горизонтальной поляризацией известны: число этажей  $n$ , расстояние между вибраторами (этажами)  $d_s$ , расстояние от вибраторов до рефлектора  $d_p$ , частота. Найти углы, соответствующие «нулевым» излучениям, в пределах основного и первого боковых лепестков рассчитать диаграмму направленности антенны в вертикальной плоскости. Расчет выполнить по десяти точкам, интервалы задаваемых углов в вертикальной плоскости выбирать исходя из ширины диаграммы направленности.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$d_p$ , мм	1400	1210	780	370	350	330
$n$	4	4	6	6	8	8
$d_s$ , мм	2850	2420	1560	1705	740	662
$f$ , МГц	52,5	62,0	96	88	202	226

Задача 11.5. Антенна посредством кабеля подключена к приемнику. Антенна, кабель и вход приемника согласованы. Определить напряжение на входе приемника, если известны: номер канала, тип антенны, тип кабеля, его длина, напряженность поля.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Канал	1	2	3	5	8	12
Антенна	АТБК-3/1	АТБК-32	АТБК-4/3	АТБК-4/5	АТБК-5/8	АТБК-5/12
Кабель	РК75-4-11	РК75-4-15	РК75-4-18	РК75-7-11	РК75-9-12	РК75-9-13
$L$ , м	40	50	40	50	25	40
$E$ , мВ/м	10	20	30	25	20	20

Задача 11.6. Определить основные размеры спиральной антенны, если известны средняя длина волны и коэффициент направленного действия.

Вариант	а	б	в	г	д	е
КНД	15	18	20	15	18	20
$\lambda$ , см	63	55	48	42	38	35

Задача 11.7. Известен номер телевизионного канала, определить полосу рабочих частот в соответствии с табл. 11.2.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Канал	24	33	45	56	59	64

Задача 11.8. Известно число этажей в антенне, расстояние между этажами  $d_s = 0,5\lambda$ , определить направления, соответствующие «нулевым» излучениям в вертикальной плоскости.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Число этажей	4	8	12	10	6	16

## ГЛАВА 12

### АНТЕННЫ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

#### 12.1. ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛОСКИХ РАСКРЫВОВ

Характеристики направленности поверхностных антенн определяются формой раскрыва и распределением поля в нем.

Прямоугольный раскрыв возбужден синфазно. Поле вдоль раскрыва имеет постоянные амплитуды  $E(x) = 1$

(рис. 12.1а). Распределение поля, близкое к данному, имеет место в раскрыве пирамидального рупора в плоскости  $E$ . Характеристика направленности в этом случае рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \frac{\sin(0,5 k L \sin \varphi)}{0,5 k L \sin \varphi} \quad (12.1)$$

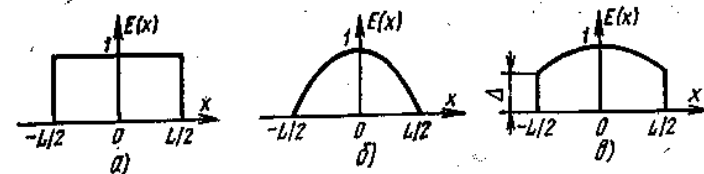


Рис. 12.1. Распределение амплитуд поля в прямоугольном раскрыве по законам:  
 а —  $E(x) = 1$ ; б —  $E(x) = \cos(\pi x/L)$ ; в —  $E(x) = 1 - 4(1 - \Delta) \times (x/L)^2$

ширина диаграммы направленности определяется уравнениями:  
 $\varphi_0 = \lambda/L = 57,3^\circ \lambda/L$ ;  $\varphi_{0,5} = 0,88 \lambda/L = 50,5^\circ \lambda/L$ . (12.2); (12.3)

Уровень первого бокового лепестка относительно основного составляет  $-13,2$  дБ, КИП раскрыва  $\nu = 1$ .

б. Амплитуды поля вдоль раскрыва изменяются по закону  $E(x) = \cos(\pi x/L)$  (рис. 12.1б). Подобное распределение имеет место в раскрыве пирамидального рупора в плоскости  $H$ . Характеристики раскрыва определяются следующими уравнениями:

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \frac{\cos(0,5 k L \sin \varphi)}{(0,5 \pi)^2 - (0,5 k L \sin \varphi)^2} \quad (12.4)$$

$$\varphi_0 = 1,5 \lambda/L = 86^\circ \lambda/L; \quad (12.5)$$

$$\varphi_{0,5} = 1,2 \lambda/L = 68,5^\circ \lambda/L. \quad (12.6)$$

Уровень первого бокового лепестка  $-23$  дБ,  $\nu = 0,81$ .

в. Амплитуды поля вдоль раскрыва изменяются по закону  $E(x) = 1 - 4(1 - \Delta) (x/L)^2$  (рис. 12.1в). В этом случае

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \left[ \frac{\sin u}{u} + (1 - \Delta) \frac{(2 - u^2) \sin u - 2 u \cos u}{u^3} \right], \quad (12.7)$$

где  $u = 0,5 k L \sin \varphi$ .

В приведенных выше формулах  $F_1(\varphi) = 1 + \cos \varphi$  — множитель, учитывающий излучение элементарной площадки раскрыва. При расчетах антенн с высокими направленными свойствами в направлениях, близких к главному,  $F_1(\varphi)$  можно не учитывать;  $L$  — длина раскрыва в рассматриваемой плоскости;  $k = 2\pi/\lambda$ .

Круглый раскрыв возбужден синфазно

а. Поле в раскрыве имеет постоянные амплитуды (рис. 12.2а). Характеристики раскрыва в этом случае определяются следующими уравнениями:

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) 0,5 J_1(u)/u; \quad \varphi_0 = 0,61 \lambda/R_0 = 34,9^\circ \lambda/R_0; \quad (12.8); (12.9)$$

$$\varphi_{0,5} = 0,51 \lambda/R_0 = 29,2^\circ \lambda/R_0. \quad (12.10)$$

Уровень первого бокового лепестка  $-17,6$  дБ,  $\nu = 1$ .



б. Амплитуды поля от центра к краям раскрыва изменяются по закону  $E(r) = 1 - (1 - \Delta)(r/R_0)^2$  (рис. 12.2б):

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) [\Delta J_1(u)/u + 4(1 - \Delta)J_2(u)/u^2]. \quad (12.11)$$

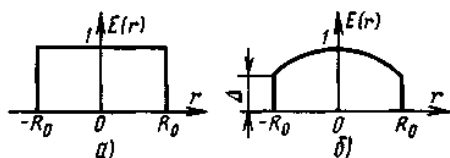


Рис. 12.2. Распределение амплитуд поля в круглом раскрыве по законам: а —  $E(r) = 1$ ; б —  $E(r) = 1 - (1 - \Delta)(r/R_0)^2$

В приведенных формулах для круглого раскрыва  $u = kR_0 \sin \varphi$ ;  $J_1(u)$  и  $J_2(u)$  — функции Бесселя первого рода соответственно первого и второго порядков. Значения функций Бесселя приведены в табл. 12.1;  $R_0$  — радиус раскрыва.

Таблица 12.1

Значения функций Бесселя первого рода нулевого, первого и второго порядков

$x$	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$J_2(x)$	$x$	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$J_2(x)$
0,0	1,0000	0,0000	0,0000	3,6	-0,3918	0,0955	0,4448
0,2	0,9900	0,0995	0,0050	3,8	-0,4026	0,0128	0,4093
0,4	0,9604	0,1960	0,0197	4,0	-0,3971	-0,0660	0,3641
0,6	0,9120	0,2867	0,0437	4,2	-0,3766	-0,1386	0,3105
0,8	0,8463	0,3688	0,0758	4,4	-0,3423	-0,2028	0,2501
1,0	0,7652	0,4401	0,1149	4,6	-0,2961	-0,2566	0,1846
1,2	0,6711	0,4983	0,1593	4,8	-0,2404	-0,2986	0,1161
1,4	0,5669	0,5419	0,2074	5,0	-0,1776	-0,3276	0,0466
1,6	0,4554	0,5699	0,2570	6,0	0,1507	-0,2767	0,2429
1,8	0,3400	0,5815	0,3061	7,0	0,3001	-0,0047	-0,3014
2,0	0,2239	0,5767	0,3523	8,0	0,1717	0,2346	-0,1130
2,2	0,1104	0,5560	0,3951	9,0	-0,0903	0,2453	0,1449
2,4	0,0025	0,5202	0,4310	10,0	-0,2459	0,0435	0,2546
2,6	-0,0968	0,4708	0,4590	11	-0,1712	-0,1768	0,1391
2,8	-0,1850	0,4097	0,4777	12	0,0477	-0,2235	-0,0849
3,0	-0,2601	0,3391	0,4861	13	0,2069	-0,0703	-0,2177
3,2	-0,3202	0,2613	0,4835	14	0,1711	0,1334	-0,1520
3,4	-0,3643	0,1792	0,4697	15	-0,0142	0,2051	0,0416

При расчетах диаграмм направленности для значений  $\varphi = 0$  необходимо учитывать, что при  $u = 0$ :

$$\frac{\sin u}{u} = 1; \frac{J_1(u)}{u} = 0,5; \frac{J_2(u)}{u^2} = 0,125.$$

## 12.2. РУПОРНЫЕ АНТЕННЫ И ОБЛУЧАТЕЛИ

Пирамидальный рупор имеет прямоугольный раскрыв (см. рис. 12.7). При расчетах в раскрыве пирамидального рупора в плоскости  $E$  амплитуды поля принимают постоянными (см. рис.

12.1а), а в плоскости  $H$  — изменяющимися по закону  $E(x) = \cos(\pi x/L_H)$  (см. рис. 12.1б).

Длина рупора в плоскости  $E$  выбирается из условия

$$R_E \geq L_E^2/2\lambda, \quad (12.12)$$

а в плоскости  $H$  — из условия

$$R_H \geq L_H^2/3\lambda, \quad (12.13)$$

где  $L_E$  и  $L_H$  — размеры раскрыва соответственно в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

При сопряжении пирамидального рупора с прямоугольным волноводом необходимо выполнить условие

$$R_H/R_E = L_H(L_E - b)/L_E(L_H - a), \quad (12.14)$$

где  $a$  и  $b$  — внутренние размеры соответственно широкой и узкой стенок волновода.

Если условие (12.14) не выполняется, то одну из длин рупора увеличивают до выполнения равенства (12.14). Для получения в плоскостях  $E$  и  $H$  одинаковой ширины диаграммы направленности по нулевым излучениям в пирамидальных рупорах берут  $L_H \approx 1,5L_E$ . Для получения равной ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности (3 дБ) выбирают  $L_H = 1,35L_E$ .

Длина конического рупора выбирается из условия

$$R \geq \frac{(2R_0)^2}{2,4\lambda} - 0,15\lambda, \quad (12.15)$$

где  $2R_0$  — диаметр раскрыва конического рупора.

Коэффициент направленного действия поверхностных антенн

$$D = 4\pi S v / \lambda^2. \quad (12.16)$$

Коэффициент использования поверхности раскрыва оптимального рупора, для которого уравнения (12.12) и (12.13) являются равенствами,  $v = 0,64$ .

## 12.3. ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

При питании параболических антенн коаксиальным фидером в качестве облучателя применяют спираль, полуволновый вибратор с настроенным контррефлектором или с аперидическим рефлектором (рис. 12.3а). При волноводном питании облучатели выполняют рупорными, вибраторными и шелевыми.

Полуволновый вибратор с пассивным настроенным контррефлектором рассчитывают как систему из двух вибраторов (см. пример 8.1). Характеристики направленности такого облучателя в плоскостях  $E$  и  $H$  рассчитываются соответственно по формулам:

$$F_E(\varphi)_{обл} = \frac{\cos(0,5\pi \sin \varphi)}{\cos \varphi} \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\Phi - kd_p \cos \varphi)}; \quad (12.17)$$

$$F_H(\varphi)_{обл} = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\Phi - kd_p \cos \varphi)}. \quad (12.18)$$

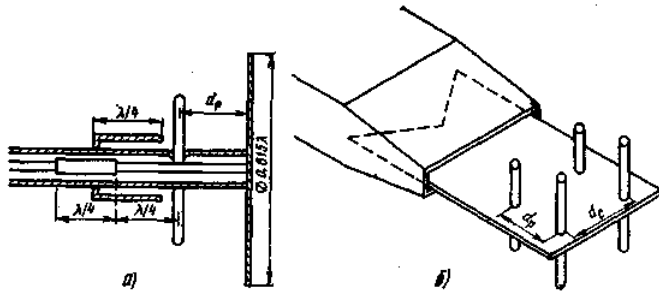


Рис. 12.3. Облучатели параболических антенн: а — полуволновый вибратор с аперiodическим рефлектором; б — четырехвибраторный облучатель с волноводным питанием

Аперiodический рефлектор выполняют в виде металлического диска диаметром  $0,815\lambda$  и располагают на расстоянии  $d_p = 0,25\lambda$  от вибратора. Характеристика направленности облучателя с аперiodическим рефлектором в плоскостях  $E$  и  $H$  рассчитывается соответственно по формулам:

$$F_E(\varphi)_{обл} = \frac{\cos(0,5\pi \sin \varphi)}{\cos \varphi} \sin(kd_p \cos \varphi); F_H(\varphi)_{обл} = \sin(kd_p \cos \varphi). \quad (12.19); (12.20)$$

Для четырехвибраторного облучателя с волноводным питанием (см. рис. 12.3б) характеристика направленности в плоскости  $E$  рассчитывается по (12.17), а в плоскости  $H$  — по (12.21):

$$F_H(\varphi)_{обл} = \frac{\cos(0,5\pi \sin \varphi)}{\cos \varphi} \cos(0,5kd_c \sin \varphi). \quad (12.21)$$

Подбором расстояния между вибраторами  $d_c$  можно получить у четырехвибраторного облучателя одинаковую ширину диаграммы направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Амплитудное распределение поля в раскрыве антенны с зеркалом в форме параболоида вращения определяется уравнением

$$E(\varphi) = F(\varphi)_{обл} \cos^2(0,5\varphi), \quad (12.22)$$

в случае параболического цилиндра — уравнением

$$E(\varphi) = F(\varphi)_{обл} \cos(0,5\varphi). \quad (12.23)$$

Площадь раскрыва зеркала определяется КНД или шириной диаграммы направленности и рассчитывается по (6.9) и (6.3). Реальный коэффициент использования поверхности раскрыва параболических антенн  $\nu \approx 0,5$ .

Площадь круглого раскрыва и его радиус связаны уравнением

$$R_0 = \sqrt{S/\pi}. \quad (12.24)$$

Для параболоида вращения фокусное расстояние  $f$ , радиус раскрыва  $R_0$  и угол раскрыва зеркала  $\Psi_0$  связаны уравнениями:

$$f = 0,5R_0 \operatorname{ctg}(0,5\Psi_0); \operatorname{tg}(0,5\Psi_0) = R_0/2f. \quad (12.25); (12.26)$$

Профиль зеркала определяется уравнением параболы

$$y^2 = 4fx. \quad (12.27)$$

Отклонение профиля зеркала от расчетного не должно превышать  $\pm(0,03-0,06)\lambda$ .

#### 12.4. ПЕРИСКОПИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Коэффициент усиления относительно изотропного излучателя перископической антенной системы определяется уравнением

$$G = (4\pi S_b/\lambda^2) \nu_b \eta_{обл}, \quad (12.28)$$

где  $S_b$  — площадь проекции верхнего зеркала на вертикальную плоскость;  $\nu_b$  — коэффициент использования поверхности раскрыва верхнего зеркала, определяется по кривым рис. 12.4;  $\eta$  — КПД

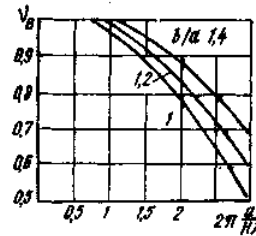


Рис. 12.4. Зависимость коэффициента использования поверхности раскрыва верхнего зеркала от размеров перископической антенной системы

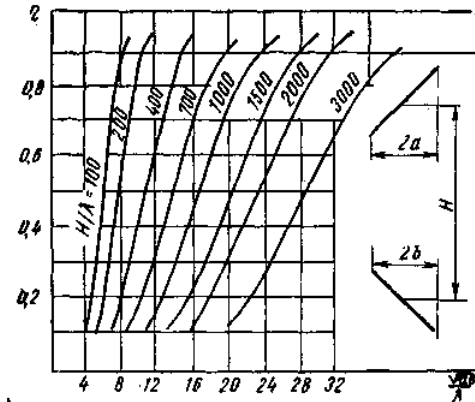


Рис. 12.5. Зависимость коэффициента полезного действия передачи энергии от нижнего зеркала к верхнему от размеров перископической антенной системы

передачи энергии от нижнего зеркала к верхнему, определяется по кривым рис. 12.5;  $\eta_{обл}$  — КПД передачи энергии от облучателя к нижнему зеркалу. В расчетах принимают  $\eta_{обл} = 0,8 \div 0,9$ .

#### 12.5. РУПОРНО-ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Коэффициент направленного действия рупорно-параболической антенны (РПА) определяется (12.16). Коэффициент использования поверхности раскрыва для РПА  $\nu = 0,65 \div 0,75$ . Угол раствора рупора выбирают в пределах  $\alpha = 35 \pm 10^\circ$ . Если желают получить равными средние размеры раскрыва РПА в вертикальной и го-

горизонтальной плоскостях, то радиусы раскрыва выбирают из условий

$$R_1 = 0,5\sqrt{S} \frac{1 - \sin(0,5\alpha)}{\sin(0,5\alpha)}; R_2 = R_1 + \sqrt{S}. \quad (12.29); (12.30)$$

Фокусное расстояние РПА

$$f = 0,5R_2[1 - \sin(0,5\alpha)] = 0,5R_1[1 + \sin(0,5\alpha)]. \quad (12.31)$$

Характеристики направленности РПА в первом приближении можно рассчитывать в плоскостях  $E$  и  $H$  соответственно по формулам (12.1) и (12.4), т. е. как антенну с прямоугольным раскрывом. Размеры раскрыва принимают равными: в вертикальной плоскости  $R_2 - R_1$ ; в горизонтальной —  $0,5(L_1 + L_2)$  (рис. 12.6).

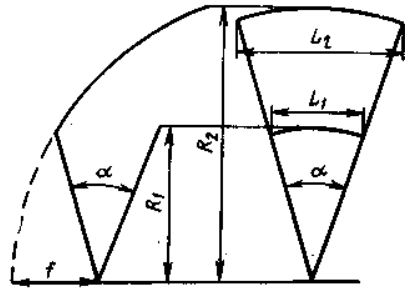


Рис. 12.6. Рупорно-параболическая антенна

Пример 12.1. Определить размеры пирамидального рупора для работы на частоте 1,5 ГГц с коэффициентом направленного действия, равным 48. Рассчитать и построить характеристики направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Решение. Длина волны  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 1,5 \cdot 10^9 = 0,2 \text{ м} = 20 \text{ см}$ .

Эффективную площадь раскрыва рупора определим из (6.8), решенного относительно  $S_{\text{эфф}}$ :

$$S_{\text{эфф}} = \frac{D\lambda^2}{4\pi} = \frac{48 \cdot 20^2}{4 \cdot 3,14} = 1529 \text{ см}^2.$$

Приняв для оптимального рупора  $\nu = 0,64$  и решая (6.3) относительно  $S$ , найдем площадь раскрыва

$$S = S_{\text{эфф}} / \nu = 1529 / 0,64 = 2390 \text{ см}^2.$$

Для получения диаграммы направленности примерно одинаковой ширины по нулевым излучениям в плоскостях  $E$  и  $H$  примем  $L_H = 1,5L_E$ . Учитывая, что площадь раскрыва  $S = L_E L_H$ , найдем размеры рупора  $S = L_E L_H = 1,5L_E^2$ :

$$L_E = \sqrt{S/1,5} = \sqrt{2390/1,5} = 40 \text{ см}; L_H = 1,5L_E = 1,5 \cdot 40 = 60 \text{ см}.$$

Используя (12.12) и (12.13), определим длины рупора в плоскостях  $E$  и  $H$ :

$$R_E \geq L_E^2 / 2\lambda = 40^2 / 2 \cdot 20 = 40 \text{ см}; R_H \geq L_H / 3\lambda = 60 / 3 \cdot 20 = 60 \text{ см}.$$

Из условия (10.21) по табл. 10.1 выберем прямоугольный волновод с сечением  $130 \times 65 \text{ мм}^2$  ( $a = 13 \text{ см}$ ,  $b = 6,5 \text{ см}$ ).

Проверим выполнение (12.14):

$$\frac{R_H}{R_E} = \frac{60}{40} = 1,5; \frac{L_H(L_E - b)}{L_E(L_H - a)} = \frac{60(40 - 6,5)}{40(60 - 12)} = 1,07; 1,5 > 1,07.$$

Для сопряжения волновода с рупором увеличим длину рупора в плоскости  $E$  до  $R_E = R_H / 1,07 = 60 / 1,07 = 56 \text{ мм}$ .

С учетом амплитудного распределения характеристики направленности в плоскости  $E$  рассчитаем по (12.1):

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \frac{\sin(0,5kL_E \sin \varphi)}{0,5kL_E \sin \varphi},$$

а в плоскости  $H$  — по (12.4):

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \frac{\cos(0,5kL_H \sin \varphi)}{(0,5\pi)^2 - (0,5kL_E \sin \varphi)^2};$$

$$0,5kL_E = 0,5(2\pi/\lambda)L_E = 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 40 / 20 = 6,28; 0,5kL_H = 0,5(2\pi/\lambda)L_H = 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 60 / 20 = 9,42.$$

Таблица 12.2

Расчет характеристики направленности пирамидального рупора по условиям примера 12.1

$\varphi$ , град.	0	5	10	15	30	60	90
$F_1(\varphi) = 1 + \cos \varphi$	2	2	1,98	1,97	1,87	1,50	1
$u_E$	0	0,55	1,09	1,62	3,14	5,44	6,28
$\sin u_E$	0	0,52	0,89	1	0	-0,74	0
$(\sin u_E) / u_E$	1	0,95	0,81	0,62	0	-0,14	0
$F_E(\varphi)$	2	1,89	1,62	1,21	0	-0,21	0
$F_E(\varphi)_H$	1	0,94	0,81	0,60	0	-0,10	0
$u_H$	0	0,82	1,64	2,44	4,71	8,15	9,42
$\cos u_H$	1	0,68	-0,07	-0,77	0	-0,17	-1
$(0,5\pi)^2 - u_H^2$	2,46	1,78	-0,23	-3,49	-19,7	-63,9	-85,2
$F_H(\varphi)$	0,81	0,76	0,60	0,43	0	0,04	0
$F_H(\varphi)_H$	1	0,93	0,74	0,53	0	0,05	0

Расчет характеристики направленности сведен в табл. 12.2, в которой приняты следующие обозначения:  $u_E = 0,5kL_E \sin \varphi$ ;  $u_H = 0,5kL_H \sin \varphi$ ;  $F_E(\varphi)_H$  и  $F_H(\varphi)_H$  — нормированные значения множителей характеристик направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Эскиз рупора изображен на рис. 12.7, диаграммы направленности приведены на рис. 12.8.

Пример 12.2. Определить основные размеры пирамидального рупора для работы на волне 15 см с шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности (3 дБ)  $\varphi_{0,5} = 40^\circ$ .

Решение. Размеры раскрыва рупора в плоскостях  $E$  и  $H$  определим соответственно из (12.3) и (12.6):

$$\varphi_{0,5} = 50,5\lambda / L_E; L_E = 50,5 / \varphi_{0,5} = 50,5 \cdot 15 / 40 = 18,9 \text{ см}; \varphi_{0,5} = 68,5\lambda / L_H;$$

$$L_H = 68,5\lambda / \varphi_{0,5} = 68,5 \cdot 15 / 40 = 25,7 \text{ см}.$$

Длины рупора в плоскостях  $E$  и  $H$  определяются соответственно (12.12) и (12.13):

$$R_E = L_E^2 / 2\lambda = 18,9^2 / 2 \cdot 15 = 12 \text{ см}; R_H \geq L_H^2 / 3\lambda = 25,7^2 / 3 \cdot 15 = 14,7 \text{ см}.$$

Пример 12.3. Определить радиус раскрыва конического рупора, имеющего в плоскости  $E$  ширину диаграммы направленности по половинной мощности  $\varphi_{0,5}=40^\circ$  при работе на волне 8 см.

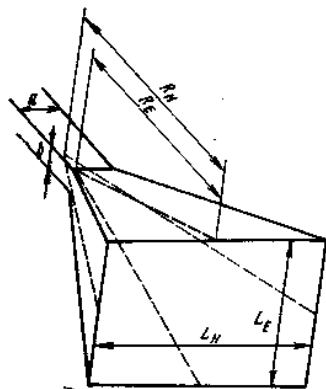


Рис. 12.7. Рупорная антенна

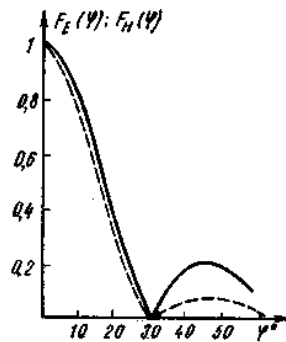


Рис. 12.8. Диаграмма направленности рупора примера 12.1:  
—  $F_E(\varphi)$ ; —  $F_H(\varphi)$

Решение. Радиус раскрыва определим из уравнения (12.10):  
 $\varphi_{0,5}=29,2^\circ \lambda/R_0$ ;  $R_0=29,2\lambda/\varphi_{0,5}=29,2 \cdot 8/40=5,8$  см.

Длина конического рупора определяется (12.16):

$$R \geq [(2R_0)^2/2,4\lambda] - 0,15\lambda = [(2 \cdot 5,8)^2/2,4 \cdot 8] - 0,15 \cdot 8 = 5,8 \text{ см.}$$

Пример 12.4. Определить основные размеры параболической антенны для работы на волне 20 см с  $D=1000$  (30 дБ). Питаящий фидер коаксиальный с волновым сопротивлением 75 Ом.

Решение. В качестве облучателя примем полуволновый вибратор с аперодическим рефлектором — контррефлектором в виде диска диаметром  $0,815\lambda=0,815 \cdot 200=163$  мм. Расстояние между вибратором и контррефлектором  $d_p=0,25 \cdot 200=50$  мм.

Собственное сопротивление полуволнового вибратора равно  $73,1+i42,5$  Ом. Сопротивление, наведенное контррефлектором, определим по табл. 8.1. Для  $a/\lambda=0$  и  $b/\lambda=2d_p/\lambda=0,5$  имеем  $Z_{12}=-(-12,5-i29,6)$  Ом. Полное сопротивление полуволнового вибратора с учетом контррефлектора

$$73,1+i42,5 - (-12,5-i29,9) = 85,6+i72,4 \text{ Ом.}$$

Диаметр вибратора примем  $2r=4$  мм, тогда его волновое сопротивление в соответствии с (7.18)

$$W = 2,76 \lg(1/r) - 120 = 276 \lg(0,25 \cdot 200/2) - 120 = 265 \text{ Ом.}$$

Длину плеча вибратора определим из условия компенсации реактивной составляющей, используя (7.26):

$$l = 0,25\lambda(1 - 2X_b/\pi W) = 0,25 \cdot 200(1 - 2 \cdot 72,4/3,14 \cdot 265) = 41 \text{ мм.}$$

Коэффициент отражения в фидере без учета реакции рефлектора (зеркала) определим, используя (10.1):

$$|\rho| = \sqrt{\frac{(R_H - W_\phi)^2 + X_H^2}{(R_H + W_\phi)^2 + X_H^2}} = \sqrt{\frac{(85,6 - 75)^2 + 0^2}{(85,6 + 75)^2 + 0^2}} = 0,066.$$

Коэффициент бегущей волны в фидере определим из (10.2):

$$K_{б.в} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|} = \frac{1 - 0,066}{1 + 0,066} = 0,88.$$

Если потребуется повысить  $K_{б.в}$ , то между вибратором и коаксиальным кабелем необходимо установить четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением, определяемым (10.25):

$$W_{тр} = \sqrt{R_H W_\phi} = \sqrt{85,6 \cdot 75} = 80 \text{ Ом.}$$

Если трансформатор устанавливается на расстоянии  $0,25\lambda$  от вибратора, то его волновое сопротивление

$$W'_{тр} = W_\phi \sqrt{W_\phi/R_H} = 75 \sqrt{75/85,6} = 70 \text{ Ом.}$$

Определим распределение амплитуд поля в раскрыве, используя (12.19), (12.20) и (12.22). Результаты расчета приведены в виде табл. 12.3. Амплитудное распределение поля в раскрыве зеркала показано на рис. 12.9.

Таблица 12.3

Расчет амплитудного распределения поля в раскрыве параболической антенны примера 12.4

$\varphi$ , град.	0	15	30	45	60	75	90
$\cos^2(\varphi/2)$	1	0,98	0,91	0,85	0,75	0,64	0,50
$(0,5\pi \sin \varphi)$	0	23,4	45,0	63,5	78	87	90
$(0,5\pi \cos \varphi)$	90	87	78	63,5	45	23,4	0
$[\cos(0,5\pi \sin \varphi)] \cdot \cos \varphi$	1	0,95	0,82	0,66	0,42	0,2	0
$\sin(0,5 \cos \varphi)$	1	1	0,98	0,89	0,71	0,4	0
$F_E(\varphi)_{обл}$	1	0,95	0,80	0,58	0,29	0,08	0
$E_E(\varphi)$	1	0,93	0,73	0,49	0,22	0,05	0
$E_H(\varphi)$	1	0,95	0,89	0,76	0,53	0,25	0

Для получения максимального коэффициента усиления рекомендуется допускать спад поля на краях раскрыва зеркала до уровня  $\Delta=0,316$  относительно напряженности поля в центре. Примем угол раскрыва зеркала  $\Psi_0=65^\circ$ , тогда при выбранном нами облучателе по кривым  $E(\varphi)$  рис. 12.9 находим для плоскости  $E$   $\Delta=0,25$ ; а для плоскости  $H$   $\Delta=0,43$ .

Расчет диаграммы направленности выполним по формуле (12.11) без учета направленных свойств элемента фронта волны  $F_1(\varphi)$ :

$$F(\varphi) = \Delta \frac{J_1(u)}{u} + 4(1 - \Delta) \frac{J_2(u)}{u^2}.$$

где  $u = kR_0 \sin \varphi$ ,  
 $kR_0 = 2\pi R_0 / \lambda = 2 \cdot 3,14 \cdot 140 / 20 = 44$ .

Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны

$$\varphi_{0,5} = (70 \div 75) \lambda / 2R_0 = 72 \cdot 20 / 2 \cdot 140 = 5,1^\circ.$$

Расчет характеристики направленности выполнен через  $2^\circ$  и сведен в табл. 12.4. Значения функций Бесселя взяты из табл. 12.1, диаграммы направленности параболической антенны для основного и первого бокового лепестков приведены на рис. 12.10.

Площадь раскрыва параболического зеркала определим из (12.16), решая его относительно  $S$ ;

$$S = \frac{\lambda^2 D}{4\pi v} = \frac{20^2 \cdot 1000}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,5} = 63\,600 \text{ см}^2.$$

Радиус раскрыва (12.24)

$$R_0 = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{63\,600/3,14} = 140 \text{ см} = 1400 \text{ мм}.$$

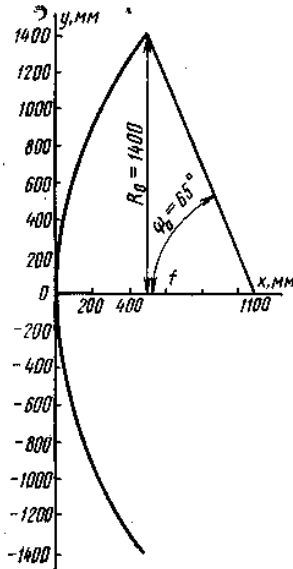
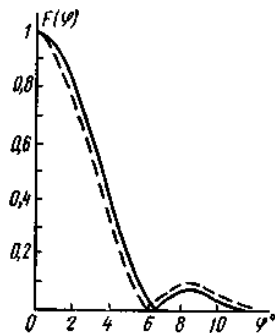
Фокусное расстояние (12.25)

$$f = 0,5R_0 \operatorname{ctg}(\Psi_0/2) = 0,5 \cdot 1400 \operatorname{ctg}(65^\circ/2) = 1100 \text{ мм}.$$

Уравнение параболы (12.27) позволяет рассчитать профиль зеркала. Решая это уравнение относительно  $x$ , имеем  $x = y^2/4f$ . Изменяя значения  $y$  от 0 до  $R_0$ , определим для каждого значения  $y$  соответствующее значение  $x$ .

Рис. 12.11. Профиль параболического зеркала антенны примера 12.3

Рис. 12.10. Диаграмма направленности параболической антенны примера 12.3:  
 —  $F_E(\varphi)$ ; —  $F_H(\varphi)$



$y, \text{ мм}$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400
$x, \text{ мм}$	0	9,1	37	82	145	228	328	445

Построение профиля приведено на рис. 12.11.

Отклонение профиля зеркала от расчетного не должно превышать  $\pm(0,03-0,06)\lambda = \pm(0,03 \cdot 200) = \pm 6 \text{ мм}$ .

Пример 12.5. Перископическая антенная система имеет площади круглых раскрывов верхнего и нижнего зеркал по  $8 \text{ м}^2$  каждого. Высота установки верхнего зеркала относительно нижнего 60 м. Определить коэффициент усиления перископической антенной системы при работе на волне 15 см.

Решение. По заданной площади определим радиусы раскрывов

$$a = b = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{8/3,14} = 1,6 \text{ м}.$$

Некоторые параметры антенной системы

$$\sqrt{ab}/\lambda = \sqrt{1,6 \cdot 1,6}/0,15 = 10,6; \quad 2\pi ab/H\lambda = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,6 \cdot 1,6/60 \cdot 0,15 = 1,78; \quad H/\lambda = 60/0,15 = 400.$$

По графикам рис. 12.4 и 12.5 по полученным параметрам находим  $\eta = 0,4$ ;  $v_b = 0,85$ . Приняв  $\eta_{\text{обл}} = 0,85$ , имеем

$$G = (4\pi S/\lambda^2) v_b \eta \eta_{\text{обл}} = (4 \cdot 3,14 \cdot 8/0,15^2) \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,85 = 1290.$$

Значению 1290 соответствует коэффициент усиления 31,1 дБ:  $10 \lg 1290 = 10 \cdot 3,11 = 31,1 \text{ дБ}$ .

Пример 12.6. Определить основные размеры рупорно-параболической антенны, имеющей  $D = 10\,000$  (40 дБ) при работе на волне 8 см.

Решение. Площадь раскрыва РПА определим по (12.16), приняв  $v = 0,7$ :

$$S = D\lambda^2/4\pi v = 10\,000 \cdot 8^2/4 \cdot 3,14 \cdot 0,7 = 72\,800 \text{ см}^2 = 7,28 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$$

Примем угол раскрыва рупора  $\alpha = 35^\circ$ . Используя (12.29), (12.30) и (12.31), определим радиусы раскрыва и фокусное расстояние (см. рис. 12.6):

$$R_1 = 0,5 \sqrt{S} \frac{1 - \sin(\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)} = 0,5 \sqrt{7,28 \cdot 10^6} \frac{1 - \sin 17,5^\circ}{\sin 17,5^\circ} = 3140 \text{ мм};$$

$$R_2 = R_1 + \sqrt{S} = 3140 + \sqrt{7,28 \cdot 10^6} = 5840 \text{ мм}; \quad f = 0,5R_2 [1 - \sin(\alpha/2)] = 0,5 \cdot 5840 (1 - \sin 17,5^\circ) = 2040 \text{ мм}.$$

Горизонтальные размеры раскрыва:

$$L_1 = 2R_1 \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 3140 \sin 17,5^\circ = 1880 \text{ мм};$$

$$L_2 = 2R_2 \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 5840 \sin 17,5^\circ = 3500 \text{ мм}.$$

Пример 12.7. Определить ширину диаграммы направленности РПА по условиям примера 12.6 при работе с вертикальной поляризацией.

Решение. В первом приближении примем, что РПА эквивалентна антенне с прямоугольным раскрывом, размеры которого в вертикальной плоскости (плоскости  $E$ )

$$L_E = R_2 - R_1 = 5840 - 3140 = 2700 \text{ мм},$$

в горизонтальной плоскости (плоскости  $H$ )

$$L_H = 0,5(L_1 + L_2) = 0,5(1880 + 3500) = 2690 \text{ мм}.$$

Приняв равноамплитудное распределение поля в плоскости  $E$ , имеем

$$\varphi_0 = 57,3^\circ \lambda / L_E = 57,3^\circ \cdot 8 / 270 = 1,7^\circ.$$

В плоскости  $H$  распределение поля примем  $E(x) = \cos(\pi x / L_H)$ , тогда

$$\varphi_0 = 85,9^\circ \lambda / L_H = 85,9^\circ \cdot 8 / 269 = 2,5^\circ.$$

Задача 12.1. Определить размеры оптимального пирамидального рупора по заданным частоте и коэффициенту направленного действия.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , ГГц	6,00	5,00	4,00	3,75	3,00	2,50
КНД	70	50	60	50	65	55

Задача 12.2. Определить коэффициент направленного действия оптимального рупора по заданным размерам раскрыва и частоте.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$L_H$ , мм	150	180	240	180	225	340
$L_E$ , мм	100	120	188	120	150	225
$f$ , ГГц	6	6	5	5	4	4

Задача 12.3. Выбрать сечение прямоугольного волновода и определить длину рупора по условиям задачи 12.2.

Задача 12.4. Определить ширину диаграммы направленности рупора по условиям задачи 12.2.

Задача 12.5. Рассчитать диаграмму направленности параболической антенны с круглым раскрывом, амплитуды поля в котором изменяются по закону  $E(r) = 1 - (1 - \Delta)(r/R_0)^2$  со спадом поля на краях раскрыва относительно центра до  $\Delta = 0,3$ , если известны частота и радиус раскрыва.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , ГГц	6	6	6	5	5	5
$R_0$ , мм	6000	3000	1000	6000	1000	500

Примечание. Расчет выполнить для значений  $u = kR_0 \sin \varphi$  в пределах от  $u=0$  до  $u=8$ .

Задача 12.6. Определить коэффициент направленного действия зеркальной параболической антенны по условиям задачи 12.5, приняв значение коэффициента использования, равным 0,5.

Задача 12.7. В перископической антенной системе заданы радиусы раскрыва верхнего  $a$  и нижнего  $b$  зеркал, высота установки верхнего зеркала над нижним  $H$  и частота. Определить коэффициент усиления перископической антенной системы.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$a$ , м	1,6	1,6	1,4	1,5	1,2	1,6
$b$ , м	1,6	2,24	1,68	1,8	1,2	1,92

$H$ , м	40	50	50	45	60	50
$f$ , ГГц	2	1,5	5	6	4	4

Задача 12.8. Заданы коэффициент направленного действия и частота. Определить основные размеры рупорно-параболической антенны. Коэффициент использования поверхности раскрыва принять равным 0,7.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$D$ , дБ	35	36	40	40	37	43
$f$ , ГГц	4	5	6	8	6	8

Задача 12.9. Заданы размеры рупорно-параболической антенны и частота. Определить коэффициент направленного действия антенны, если коэффициент использования поверхности раскрыва равен 0,7.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$L_1$ , мм	1935	4660	1935	4660	1935	4660
$L_2$ , мм	3500	6590	3500	6590	3500	6590
$R_1$ , мм	3070	5475	3070	5475	3070	5475
$R_2$ , мм	5900	8080	5900	8080	5900	8080
$f$ , ГГц	3,4	3,5	3,6	3,6	3,75	3,75

Задача 12.10. Определить ширину диаграммы направленности рупорно-параболической антенны при вертикальной поляризации по условиям задачи 12.9.

## ГЛАВА 13

### АНТЕННЫ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН



#### 13.1. ВВЕДЕНИЕ

В диапазоне декаметровых волн связь на большие расстояния осуществляется пространственными волнами. Оптимальные углы излучения и приема в вертикальной плоскости при работе пространственной волной определяются по кривым рис. 3.3. При этом чаще используют горизонтальную поляризацию. Оптимальная высота подвеса антенны с горизонтальной поляризацией определяется (8.21). На рис. 13.1 приведены графики зависимости направ-

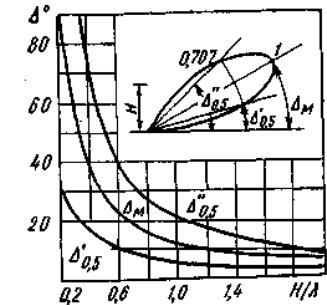


Рис. 13.1. Зависимость в вертикальной плоскости направлений максимального излучения и направлений, соответствующих уровню 50% по мощности от относительной высоты подвеса горизонтального вибратора

лений максимального излучения и направлений, соответствующих уровню 0,5 по мощности от максимального, в вертикальной плоскости для горизонтального вибратора от его относительной высоты подвеса. Эти графики справедливы для антенн типов ВГД и ВГДШ.

### 13.2. СЛАБОНАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

К слабонаправленным антеннам с горизонтальной поляризацией относятся вибратор горизонтальный диапазонный (ВГД), часто называемый диполем С. И. Надененко, и вибратор горизонтальный диапазонный с шунтом (ВГДШ). Эти антенны рекомендуется применять на трассах протяженностью 400—600 км.

Антенны ВГД рекомендуется использовать в диапазоне волн  $\lambda = (1,7 \div 3,3)l$ . (13.1)

Диаграммы направленности ВГД в горизонтальной и вертикальной плоскостях рассчитываются соответственно по (7.8) и (8.18). Волновое сопротивление ВГД, выполненного из  $n$  параллельных проводов длиной  $l$ , радиусом проводов  $r$ , расположенных по образующей цилиндра радиусом  $R$ ,

$$W_{\text{в}} = 276 \lg(l/R) \sqrt{n/r/R}. \quad (13.2)$$

Сопротивление излучения ВГД определяется по кривым рис. 7.2, входное сопротивление — по (7.22) или (7.23).

Эффективное значение тока в пучности тока

$$I_{\text{п.эфф}} = \sqrt{P/R_{\Sigma \text{п}}}. \quad (13.3)$$

Эффективное значение напряжения на концах вибратора

$$U_{\text{п.эфф}} = W_{\text{в}} I_{\text{п.эфф}}. \quad (13.4)$$

Амплитуда напряженности поля у поверхности проводника

$$E = 60 \sqrt{2} U_{\text{эфф}} / nr W_{\text{в}}. \quad (13.5)$$

Допустимой амплитудой напряженности поля при амплитудной модуляции считают  $E_{\text{доп}} \leq 8$  кВ/см, на влажных изоляторах  $E_{\text{доп}} \leq 1,5$  кВ/см.

Антенны ВГДШ рекомендуется использовать в диапазоне  $\lambda = (1,67 \div 6,25)l$ . Расстояние между мачтами для подвеса ВГД и ВГДШ берут на 7—8 м больше полной длины вибратора ( $2l$ ). Высота мачт выбирается с учетом стрелы провеса вибраторов, которая составляет 0,05—0,07 от расстояния между мачтами.

### 13.3. СИНФАЗНЫЕ АНТЕННЫ

Синфазные горизонтальные диапазонные антенны с аперриодическим рефлектором обозначаются СГД( $n_s/n_b$ )РА, где  $n_s$  — число этажей в антенне;  $n_b$  — число вибраторов (полуволновых) в каждом этаже ( $n_b$  равно числу плеч всех симметричных вибраторов

одного этажа). Синфазные антенны преимущественно используются для передачи программ звукового вещания в соответствии с табл. 13.1. Коэффициент усиления коротковолновых антенн от

Таблица 13.1

#### Рекомендация по выбору антенн для радиовещания

Протяженность трассы, км	Тип антенны	$\lambda_0$ , м	Высота подвеса нижнего этажа
6000 и более	СГД(8/8)РА	19,5 и 34	$\lambda_0$
4000 — 6000	СГД(4/4)РА	12; 26 и 40	$(0,75 — 1)\lambda_0$
2000 — 4000	СГД(4/4)РА	12; 26 и 40	$(0,5 — 0,75)\lambda_0$
1000 — 2000	СГД(2/4)РА	18 и 40	$0,5\lambda_0$
600 — 1000	СГД(1/4)РА	21 и 50	$0,5\lambda_0$
400 — 600	СГД(1/2)РА ВГД или ВГДШ	24 и 50	$0,5\lambda_0$

носительно полуволнового вибратора определяется (6.16). Максимальные значения коэффициента усиления синфазных антенн в зависимости от отношения рабочей длины волны к строительной  $\lambda_0$  приведены на рис. 13.2.

Коэффициент направленного действия СГД( $n_s/n_b$ )РА приближенно можно определить по формуле

$$D = 4\pi k_{\text{р.з}} S / \lambda^2, \quad (13.6)$$

где  $S = n_s d_s n_b l$  — площадь раскрыва антенны;  $k_{\text{р.з}} = 3 \div 4,5$  — коэффициент, учитывающий влияние земли и рефлектора;  $n_b$  — число

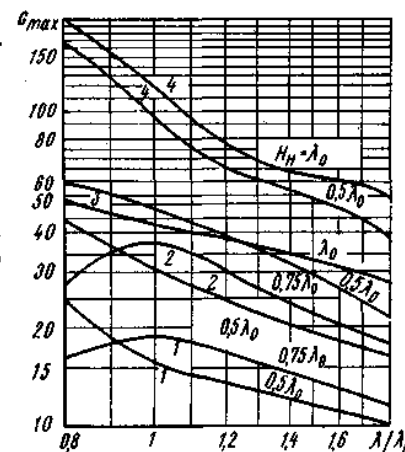


Рис. 13.2. Зависимость коэффициента усиления (относительно полуволнового вибратора) от длины волны синфазных антенн:

1 — СГД 1/2 РА; 2 — СГД 1/4 РА; 3 — СГД 2/4 РА; 4 — СГД 4/4 РА

этажей;  $d_s$  — расстояние между этажами;  $n_b$  — число плеч вибраторов в каждом этаже;  $l$  — длина плеча вибратора.

Диаграммы направленности антенны СГД( $n_s/n_b$ )РА рассчитываются по (8.1), (8.2), (8.8), (8.9), (8.12), (8.18) и (8.23).

В горизонтальной плоскости для углов  $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$

$$F(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin \varphi) - \cos kl}{\cos \varphi} \frac{\sin(0,5 n k d \sin \varphi)}{\sin(0,5 k d \sin \varphi)} \sin(k d_p \cos \varphi), \quad (13.7)$$

где  $n = 0,5 n_b$  — число симметричных вибраторов в одном этаже;  $d$  — расстояние между центрами симметрирующих вибраторов в горизонтальной плоскости.

В вертикальной плоскости для углов  $0 < \varphi < 90^\circ$

$$F(\Delta) = \frac{\sin(0,5 n_0 k d_0 \sin \Delta)}{\sin(0,5 k d_0 \sin \Delta)} \sin(k d_p \cos \Delta) \sin(k H_{cp} \sin \Delta), \quad (13.8)$$

В задних квадрантах для углов  $\varphi=90 \div 270^\circ$  и  $\Delta=90 \div 180^\circ$ :

$$F(\varphi) = \sqrt{\sigma} \frac{\sin(0,5 n k d \sin \varphi)}{\sin(0,5 k d \sin \varphi)} \frac{\cos(k l \sin \varphi) - \cos k l}{\cos \varphi}; \quad (13.9)$$

$$F(\Delta) = \sqrt{\sigma} \frac{\sin(0,5 n_0 k d_0 \sin \Delta)}{\sin(0,5 k d_0 \sin \Delta)} \sin(k H_{cp} \sin \Delta), \quad (13.10)$$

где  $\sigma$  — коэффициент прохождения волны через рефлектор, определяемый уравнением (8.22). В формулах (13.7)–(13.10) опущены постоянные коэффициенты, не влияющие на форму диаграмм направленности.

При проектировании антенн типа СГД-РА рекомендуется выбирать длину плеча вибратора  $l=(0,39 \div 0,41)\lambda_0$ , волновое сопротивление вибраторов  $W=350 \div 470$  Ом, расстояния между центрами вибраторов в горизонтальной плоскости  $d=\lambda_0$ , расстояния между этажами  $d_0=0,5\lambda_0$ , расстояния от вибраторов до рефлектора  $d_p=(0,27 \div 0,3)\lambda_0$ , коэффициент прохождения волны через рефлектор  $\sigma \leq 0,1$ . Здесь  $\lambda_0$  — строительная длина волны. При проектировании аперийного рефлектора рекомендуется принимать  $d_0=(0,035 \div 0,07)\lambda_0$  и радиус проводов рефлектора равным 1,3–3 мм.

Диаграммы направленности синфазных антенн в вертикальной плоскости приведены на рис. 13.3, в горизонтальной плоскости — на рис. 13.4. В технических расчетах коэффициент полезного дей-

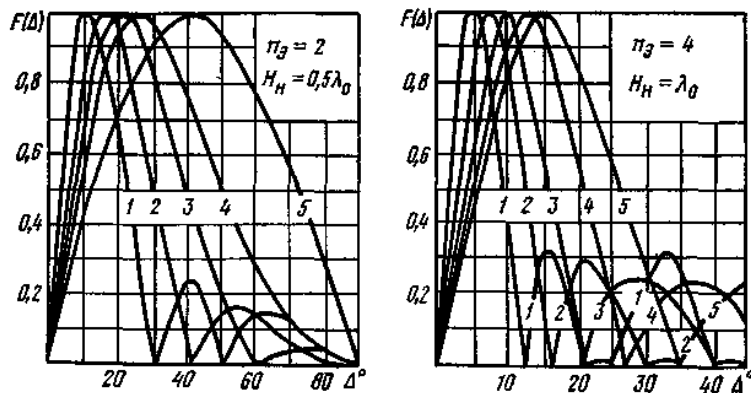


Рис. 13.3. Диаграммы направленности синфазных антенн в вертикальной плоскости:  
1 —  $\lambda=0,75\lambda_0$ ; 2 —  $\lambda=\lambda_0$ ; 3 —  $\lambda=1,3\lambda_0$ ; 4 —  $\lambda=1,6\lambda_0$ ;  
5 —  $\lambda=2\lambda_0$

ствия синфазных антенн принимают равным 100% ( $\eta_a=1$ ), СГД-РА рекомендуется использовать в диапазоне  $\lambda_p=(0,75 \div 1,6)\lambda_0$ . Работа на более коротких волнах ограничивается ухудшением диа-

грамм направленности: ростом уровня боковых лепестков, значительным отклонением направления максимального излучения в вертикальной плоскости от оптимального. На более длинных вол-

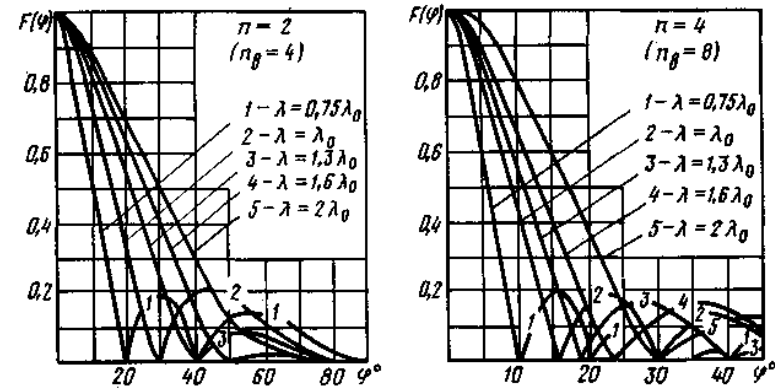


Рис. 13.4. Диаграммы направленности синфазных антенн в горизонтальной плоскости

нах резко уменьшается коэффициент усиления антенны. При работе на краях рабочего диапазона ухудшается согласование антенны с фидером.

### 13.4. РОМБИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Ромбическая горизонтальная антенна с половиной тупого угла  $70^\circ$ , длиной стороны ромба, равной  $6\lambda_0$ , и высотой подвеса  $1,25\lambda_0$  обозначается РГ(70/6)1,25. Для увеличения коэффициента усиления и снижения уровня боковых лепестков в диаграмме направленности применяют двойные ромбические антенны, например РГД(65/4)1. В качестве передающих ромбических антенн рекомендуется применять в зависимости от протяженности трассы в соответствии с табл. 13.2. Параметры ромбических антенн приведены на рис. 13.5.

Таблица 13.2

#### Рекомендации по выбору антенн для радиосвязи

Протяженность трассы, км	Тип антенны	$\lambda_0$ , м
6000 и более	РГД(70/6)1,25	15; 25 и 40
4000 — 6000	РГД(70/6)1,25 РГД(65/4)1	15 и 25 40
2000 — 4000	РГД(65/4)1	12,5; 22 и 35
1000 — 2000	РГД(65/2,8)0,6	22 и 43
600 — 1000	РГД(57/1,7)0,5	20 и 40
400 — 600	СГД 1/2 РА, ВГД или ВГДШ	$\lambda=(0,78 \div 1,5)\lambda_0$



Входным сопротивлением одного полотна ромбической антенны является ее волновое сопротивление вблизи острых углов. Волновое сопротивление ромбической антенны, за исключением небольших участков острых углов, определяется уравнением

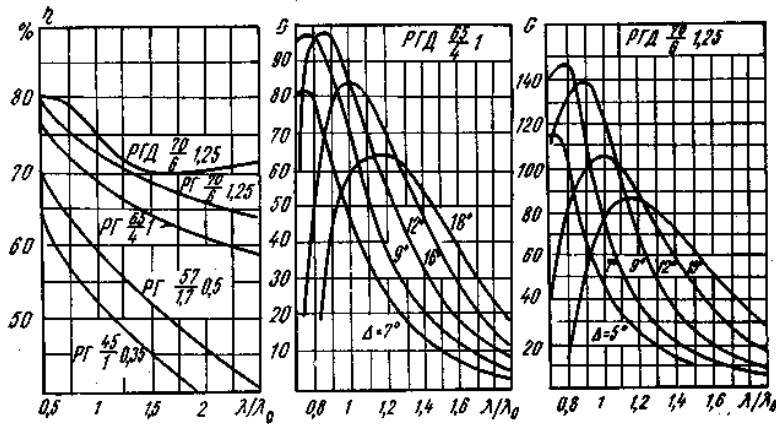


Рис. 13.5. Параметры ромбических антенн

$$W_a = 276 \lg(\lambda/\pi r) - 120 \quad (13.11)$$

и вблизи острых углов — уравнением

$$W_0 = 276 \lg(\lambda \sin \varphi_m / 2\pi r) - 69, \quad (13.12)$$

где \$\varphi\_m\$ — половина острого угла ромба.

Если в ромбе, для снижения его волнового сопротивления, каждая сторона выполняется из двух проводов, то в данных формулах вместо радиуса провода \$r\$ подставляют эквивалентный радиус \$r\_s = \sqrt{hr}\$, где \$h\$ — расстояние между однополярными проводами в данном сечении. В вершине острого угла ромба \$h = 2r\$, в вершине тупого угла \$h = (0,02 \div 0,03)L\_0\$, где \$L\$ — длина одной стороны ромба.

Сопротивление излучения одной стороны ромба при \$L > 2\lambda\$ определяется уравнением

$$R_{\Sigma 1} = 60 [2,3 \lg 2kL + (\sin 2kL) / 2kL - 0,423]. \quad (13.13)$$

Полное сопротивление излучения ромба

$$R_{\Sigma a} = 4 R_{\Sigma 1}. \quad (13.14)$$

Коэффициент полезного действия ромба

$$\eta = 1 - e^{-R_{\Sigma a} / W_a}. \quad (13.15)$$

Оптимальная длина стороны ромба \$L\_{\text{опт}}\$ и оптимальный угол излучения в вертикальной плоскости \$\Delta\_m\$ связаны уравнением

$$L_{\text{опт}} = \lambda / 2 (1 - \cos^2 \Delta_m). \quad (13.16)$$

Высота подвеса ромбической антенны определяется (8.21). Диаграмма направленности ромбической антенны рассчитывается по формуле

$$F_{\text{РГ}}(\varphi, \Delta) = \left[ \frac{\cos(\Phi + \varphi)}{1 - \sin(\Phi + \varphi) \cos \Delta} + \frac{\cos(\Phi - \varphi)}{1 - \sin(\Phi - \varphi) \cos \Delta} \right] \times \\ \times \sin\{0,5kL[1 - \sin(\Phi + \varphi) \cos \Delta]\} \times \\ \times \sin\{0,5kL[1 - \sin(\Phi - \varphi) \cos \Delta]\} \sin(kH \sin \Delta). \quad (13.17)$$

Расчет \$F(\varphi)\$ производят по (13.17) изменением углов \$\varphi\$ от 0 до \$180^\circ\$ при выбранном угле излучения в вертикальной плоскости \$\Delta\$. Для двойной ромбической антенны

$$F_{\text{РГД}}(\varphi) = F_{\text{РГ}}(\varphi) \cos(0,5kD_1 \sin \varphi), \quad (13.18)$$

где \$D\_1 = (0,8 \div 1)\lambda\_0\$ — расстояние между большими диагоналями ромбов.

При расчете \$F(\Delta)\$ в (13.17) полагают \$\varphi = 0\$ и изменяют угол \$\Delta\$ от 0 до \$180^\circ\$. В вертикальной плоскости диаграммы направленности РГ и РГД одинаковы.

Поглощающая линия выполняется из фехралевых, реже из стальных проводов диаметром \$2r = 1 \div 3\$ мм.

Длина двухпроводной поглощающей линии

$$L_{\text{пл}} = (2,5 \div 3) W_{\text{пл}} / R_1; \quad R_1 = (11\,000/r) \sqrt{\mu' \rho / \lambda}. \quad (13.19); (13.20)$$

Здесь \$R\_1\$ — сопротивление на единицу длины двухпроводной поглощающей линии; \$r\$ — радиус провода линии, мм; \$\mu'\$ — относительная магнитная проницаемость провода; \$\rho\$ — удельное сопротивление провода, Ом·м; \$\lambda\$ — длина волны, м.

Для стали (железа) и фехраля на высоких частотах относительная магнитная проницаемость \$\mu' = 80\$. Удельное сопротивление стали \$\rho = 10^{-7}\$ Ом·м, никрома \$(1 \div 1,1) \cdot 10^{-6}\$ Ом·м, фехраля \$(1,1 \div 1,3) \cdot 10^{-6}\$ Ом·м.

### 13.5. ПРИЕМНЫЕ АНТЕННЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Антенны бегущей волны рекомендуется применять в зависимости от протяженности трассы в соответствии с табл. 13.3. Тип антенны БС 2  $\frac{21}{8} \frac{200}{4,5}$  25 расшифровывается как антенна бегущей

Таблица 13.3

Рекомендации по выбору приемных антенн

Протяженность трассы, км	Тип антенны
4000 км и более	3 БС 2(21/8) (200/4,5) 25
2000 — 4000	БС 2(21/8) (200/4,5) 25
1000 — 2000	БС 2(21/8) (200/4,5) 17
400 — 1000	БС 2(14/11) (200/4,5) 11

волны с активными сопротивлениями связи, состоящая из двух полотен. В каждом полотне антенна имеет по  $n=21$  симметричному вибратору с длиной плеча  $l=8$  м, сопротивление связи в каждом плече вибратора  $R_{св}=200$  Ом, расстояние между вибраторами  $d=4,5$  м, высота подвеса антенны  $H=25$  м.

Коэффициент направленного действия антенны бегущей волны определяется по кривым рис. 13.6 или приближенно по формуле

$$D = (4 \div 6) \cdot L / \lambda, \quad (13.21)$$

где  $L = (n-1)d$  — длина полотна антенны.

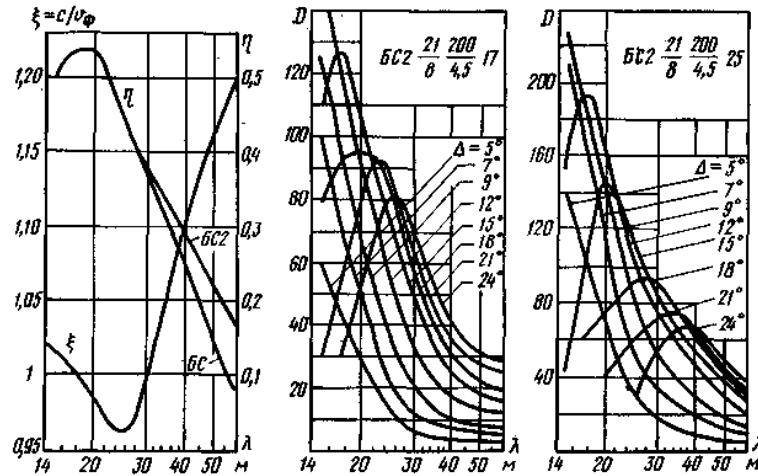


Рис. 13.6. Параметры антенн бегущей волны

Значение КПД антенны приведено на рис. 13.6. Коэффициент усиления антенны бегущей волны относительно полуволнового вибратора определяется формулой (6.16). Диаграммы направленности горизонтальной антенны бегущей волны в горизонтальной плоскости рассчитываются по формуле

$$F_{BC}(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin \varphi) - \cos kl}{\cos \varphi} \frac{\sin[0,5 nkd(\xi - \cos \varphi)]}{n \sin[0,5 kd(\xi - \cos \varphi)]}, \quad (13.22)$$

в вертикальной плоскости — по формуле

$$F_{BC}(\Delta) = \frac{\sin[0,5 nkd(\xi - \cos \Delta)]}{n \sin[0,5 kd(\xi - \cos \Delta)]} \sin(kH \sin \Delta), \quad (13.23)$$

где  $\xi$  — коэффициент укорочения волны в антенне, определяемый из рис. 13.6.

Для антенн, состоящих из двух полотен (BC 2),

$$F_{BC2}(\varphi) = F_{BC}(\varphi) \cos(0,5 k D_1 \sin \varphi); \quad F_{BC2}(\Delta) = F_{BC}(\Delta). \quad (13.24); \quad (13.25)$$

Здесь  $D_1$  — расстояние между центрами полотен антенны.

Действующая длина приемной антенны при работе на согласованный фидер

$$L_d = (\lambda/\pi) \sqrt{G \eta_{\phi} W_{\phi} / 73,1}. \quad (13.26)$$

При проектировании антенн бегущей волны рекомендуется выбирать  $l \leq 0,64 \lambda_{кор}$ ,  $n = 14 \div 21$ ,  $d = 4,5$  м,  $R_{св} = 200 \div 400$  Ом в каждом плече вибратора. Сопротивления связи безындукционные, мощностью 2—5 Вт. Расстояние между центрами полотен в антенне BC 2 берут  $D_1 = 25 \div 26$  м при  $l = 8$  м и  $D_1 = 30$  м при  $l = 11$  м. Оптимальная высота подвеса определяется уравнением (8.21). Рекомендуется применять антенны с высотами подвеса 11, 17 и 25 м.

В профессиональной связи в диапазоне декаметровых волн ведут одвоенный прием, реже строенный. Сдвоенный и строенный приемы осуществляют на антенны, разнесенные в пространстве на расстояние 200—400 м друг от друга. При ограниченной территории антенного поля возможен прием на антенны с разными поляризациями: с горизонтальной и вертикальной.

Вертикальная несимметричная антенна бегущей волны с активными сопротивлениями связи имеет обозначение БСВН.

Характеристика направленности антенны БСВН2 в горизонтальной плоскости определяется уравнением

$$F(\varphi) = \frac{\sin[0,5 nkd(\xi - \cos \varphi)]}{n \sin[0,5 kd(\xi - \cos \varphi)]} \cos(0,5 k D_1 \sin \varphi). \quad (13.27)$$

В вертикальной плоскости характеристика направленности существенно зависит от параметров почвы. В случае почвы с идеальной проводимостью

$$F(\Delta) = \frac{\cos(kl \sin \Delta) - \cos kl}{\cos \Delta} \frac{\sin[0,5 nkd(\xi - \cos \Delta)]}{n \sin[0,5 kd(\xi - \cos \Delta)]}. \quad (13.28)$$

Антенны БСВН имеют меньшую стоимость, чем, например, антенны БС. Недостатком антенн БСВН являются более высокие уровни боковых лепестков в диаграмме направленности в горизонтальной плоскости и, как следствие, худшая помехозащищенность.

Согласование антенн бегущей волны с симметричным приемным фидером, имеющим волновое сопротивление 208 Ом, осуществляется посредством экспоненциальных трансформаторов. Антенна БС согласуется с фидером шестипроводным трансформатором ТФ6 168/208, БС2 — трансформатором, выполненным в виде снижения, ТФ6 168/208 и двух горизонтальных трансформаторов ТФ6 208/416. Волновое сопротивление собирательной линии в антеннах БС берут равным 170 Ом. Волновое сопротивление собирательной линии антенны является входным сопротивлением ее одного полотна. При параллельном соединении входное сопротивление уменьшается вдвое.

При работе любой антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях под углами, отличающимися от оптимальных, коэффициенты направленного действия и коэффициенты усиления антенн определяются по формулам

$$G = G_{max} F^2(\Delta)_{н} F^2(\varphi)_{н}; \quad D = D_{max} F^2(\Delta)_{н} F^2(\varphi)_{н}, \quad (13.29); \quad (13.30)$$

где  $F(\Delta)_н$  и  $F(\varphi)_н$  — нормированные множители характеристик направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

### 13.6. АНТЕННА КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

Для передачи радиовещания в пределах круговой зоны радиусом от 400 до 1000 км, МККР рекомендует применять антенны горизонтальной поляризации с излучением в вертикальной плоскости под большими углами к горизонту. Антенна представляет собой систему из четырех горизонтальных волновых вибраторов с пониженным волновым сопротивлением, расположенных по сторонам квадрата с длиной стороны, равной длине волны. Высоту подвеса вибраторов над поверхностью Земли рекомендуется брать равной  $0,15\lambda$  (рис. 13.7). Параллельные друг другу вибраторы,

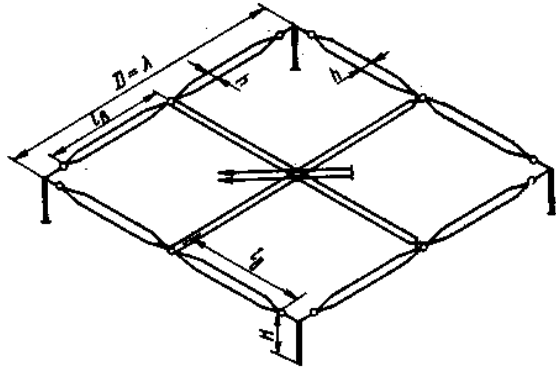


Рис. 13.7. Антенна для передачи радиовещания в пределах круговой зоны радиусом от 400 до 1000 км

расположенные на противоположных сторонах квадрата, питаются противофазно. Этим достигается более равномерная характеристика направленности в горизонтальной плоскости при излучении под углами  $50-75^\circ$  к горизонту. В вертикальной плоскости излучение вдоль поверхности Земли ( $\Delta=0^\circ$ ) и строго в зенит ( $\Delta=90^\circ$ ) отсутствует. Согласование активного входного сопротивления антенны с фидером достигается подбором волновых сопротивлений вибраторов и согласующим шлейфом настройки.

Характеристика направленности антенны в вертикальной плоскости, проходящей через центры двух вибраторов и перпендикулярной им, определяется уравнением

$$F(\Delta) = \sin(0,5kD \cos \Delta) \sin(kH \sin \Delta), \quad (13.31)$$

где  $D=\lambda$  — расстояние между параллельными вибраторами (длина стороны квадрата);  $H=0,15\lambda$  — высота подвеса антенны.

При питании антенны симметричным двухпроводным фидером с волновым сопротивлением 600 Ом распределительные фидеры выполняются также двухпроводными с волновым сопротивлением

по 600 Ом, а вибраторы с волновым сопротивлением 450—500 Ом. Вибратор с таким волновым сопротивлением может выполняться из двух или трех проводов. При большой мощности излучения под антенной необходимо устройство заземления.

Пример 13.1. Выбрать основные размеры ВГД для работы в диапазоне 37,5—60 м. На средней волне диапазона  $\lambda_{ср}=47,5$  м угол, соответствующий максимальному излучению в вертикальной плоскости, должен быть равен  $50^\circ$ , мощность, подводимая к вибратору, 50 кВт.

Решение. Длину плеча вибратора определим из уравнения 13.1:  $l=\lambda/(1,7\div 3,3)$ ;  $l\leq\lambda_{min}/1,7=37,5/1,7=22$  м;  $l\geq\lambda_{max}/3,3=60/3,3=18,18$  м. Примем  $l=20$  м.

Высоту подвеса вибратора определим, используя уравнение (8.21):  $H=\lambda/4 \sin \Delta=47,5/4 \sin 50^\circ=25$  м.

Радиус образующей, по которой расположены провода вибратора, примем  $R=0,05l=0,05\cdot 20=1$  м. Вибратор выполним из шести ( $n=6$ ) проводов диаметром 4 мм.

Волновое сопротивление вибратора (13.2)

$$W_v = 276 \lg(1/R \sqrt{nr/R}) - 120 = 276 \lg(20/1 \sqrt{6\cdot 0,0002/1}) - 120 = 326 \text{ Ом.}$$

Наиболее длинной волне диапазона соответствует  $l/\lambda=20/60=0,3$ . Из табл. 7.1 для  $l/\lambda=0,3$  находим сопротивление излучения 120 Ом.

Эффективное значение тока в пучности вибратора

$$I_{п.эфф} = \sqrt{P/R_{изл}} = \sqrt{50\,000/120} = 20,4 \text{ А.}$$

Эффективное значение напряжения на конце вибратора

$$U_{п.эфф} = W_v I_{п.эфф} = 326 \cdot 20,4 = 6650 \text{ В.}$$

Напряженность поля у поверхности проводов вибратора

$$E = 60 \sqrt{2} U_{п.эфф} / nr W_v = 60 \sqrt{2} \cdot 6650 / 6 \cdot 0,2 \cdot 326 = 1440 \text{ В/см.}$$

Расстояние между мачтами  $L=2\cdot 20+8=48$  м.

Стрела провеса  $f=(0,05\div 0,07)L=0,06\cdot 48=2,88$  м.

Высота установки блока для крепления троса вибратора  $25+2,88\approx 28$  м.

Пример 13.2. Антенна ВГД имеет длину плеча 12 м и высоту подвеса 10 м. Определить диапазон рабочих волн и углы, соответствующие максимальному излучению в вертикальной плоскости.

Решение. Используя (13.1) и (8.19), получим  $\lambda=(1,7\div 3,3)l=$

для  $\lambda=20,4$  м  $\sin \Delta_m=\lambda/4H=20,4/4\cdot 10=0,51$ ;  $\Delta_m=30^\circ$ ; для  $\lambda=39,6$  м  $\sin \Delta_m=39,6/4\cdot 10=0,99$ ;  $\Delta_m=90^\circ$ . Из примера следует, что изменение рабочей длины волны приводит к значительным изменениям направления максимального излучения вибратора в вертикальной плоскости.

Пример 13.3. Выбрать тип антенны для передачи радиовещания на трассе протяженностью 1500 км и определить ее основ-

ные размеры. Рассчитать коэффициент усиления антенны при работе на волнах 18, 23,4 и 29 м под углом в вертикальной плоскости, равным  $15^\circ$  и на  $10^\circ$ , отличающимся от направления главного излучения в горизонтальной плоскости.

Решение. По протяженности трассы и рабочим длинам волн из табл. 13.1 выбираем антенну СГД(2/4)РА со строительной длиной волны  $\lambda_0 = 18$  м и высотой подвеса нижнего этажа  $H_n = 0,5\lambda_0 = 9$  м. Данному типу антенны соответствуют следующие размеры: длина плеча вибратора  $l = 0,41\lambda_0 = 0,41 \cdot 18 = 7,38$  м; расстояние между этажами  $d_s = 0,5\lambda_0 = 9$  м; число этажей  $n_s = 2$ ; число вибраторов в каждом этаже  $n_b = 4$ , или по два симметричных вибратора:  $n = n_b/2 = 4/2 = 2$ ; расстояние между центрами симметричных вибраторов  $d = \lambda_0 = 18$  м.

Средняя высота подвеса полотна антенны

$$H_{cp} = H_n + (n_s - 1)0,5d_s = 9 + (2 - 1)0,5 \cdot 9 = 13,5 \text{ м.}$$

Расстояние от рефлектора до вибраторов

$$d_p = (0,27 \div 0,3)\lambda_0 = 0,3 \cdot 18 = 5,4 \text{ м.}$$

Расстояния между проводами аperiodического рефлектора

$$d_s = (0,035 \div 0,07)\lambda_0 = 0,35 \cdot 18 = 0,63 \text{ м.}$$

Рефлектор выполним проводом диаметром 4 мм. Коэффициент прохождения рефлектора определим по (8.23):

$$\sigma = \frac{1}{1 + [\lambda/4,6 d_s \lg(2\pi r/d_s)]^2} = \frac{1}{1 + [18/4,6 \cdot 0,63 \lg(6,28 \cdot 0,002/0,63)]^2} = 0,07.$$

Коэффициенты усиления антенны найдем по графикам рис. 13.2. Значения нормированных множителей диаграмм направленности  $F(\Delta)$  и  $F(\varphi)$  при работе под углами  $\Delta = 15^\circ$  и  $\varphi = 10^\circ$  определим по графикам рис. 13.3 и 13.4. Коэффициент усиления определим по (13.29). Расчет сведем в таблицу

$\lambda$ , м	$\lambda/\lambda_0$	$G_{max}$	$F(\Delta)$	$F(\varphi)$	$G$
18	1	48	1	0,75	27
23,4	1,3	37	0,95	0,85	24
29	1,6	27	0,8	0,88	13,4

Пример 13.4. Выбрать тип антенны для линии радиосвязи протяженностью 3000 км и определить основные размеры антенны для работы в диапазоне 18—31 м.

Решение. Средняя длина волны  $\lambda_{cp} = \sqrt{18 \cdot 31} = 23,7$  м.

По табл. 13.2 выбираем антенну РГД(65/4)1,  $\lambda_0 = 22$  м.

Длина стороны ромба  $L = 4\lambda_0 = 4 \cdot 22 = 88$  м, половина тупого угла ромба  $65^\circ$ , острый угол ромба  $2\varphi_m = 2(90 - 65) = 50^\circ$ . Средняя высота подвеса полотна ромба  $H = \lambda_0 = 22$  м. Стрела провеса проводов  $(0,05 \div 0,07)L = 0,057 \cdot 88 = 5$  м.

Поглощающую линию выполним из фехралевого провода диаметром 2 мм волновым сопротивлением 350 Ом. Погонное сопротивление двухпроводной поглощающей линии найдем по (13.20):

$$R_l = (11\,000/r) \sqrt{\mu' \rho / \lambda} = (11\,000/1) \sqrt{8 \cdot 12 \cdot 10^{-7} / 31} = 19,4 \text{ Ом/м.}$$

Необходимая длина поглощающей линии (13.19)

$$L_{пл} = (2,5 \div 3) W_{пл} / R_l = (2,5 \div 3) 350 / 19,4 = 45 \div 54 \text{ м.}$$

Параметр  $2kL_{пл} = 2 \cdot 2,3 \cdot 14 \cdot 88 / 31 = 35,6$  рад, или  $2043^\circ$ .

Сопротивление излучения одной стороны ромба (13.13)

$$R_{\Sigma 1} = 60[2,3 \lg 2kL + (\sin 2kL) / 2kL - 0,423] = \\ = 60[2,3 \lg 35,6 + (\sin 2043^\circ / 35,6) - 0,423] = 189 \text{ Ом.}$$

Длина поглощающей линии и сопротивление излучения определены для длинной волны диапазона. Для повышения КПД каждую сторону ромба выполним из двух проводов диаметром 4 мм, расходящихся к вершинам тупых углов на расстояние

$$h = (0,02 \div 0,03)L = 0,023 \cdot 88 = 2 \text{ м.}$$

Эквивалентный радиус для области тупого угла ромба  $r_s = \sqrt{r h} = \sqrt{0,002 \cdot 2} = 0,063$  м. Волновое сопротивление ромба  $W_a = 276 \lg(\lambda / \pi r) - 120 = 276 \lg(31 / 3,14 \cdot 0,063) - 120 = 480$  Ом.

Коэффициент полезного действия антенны (13.15)

$$\eta_a = 1 - e^{-R_{\Sigma a} / W_a} = 1 - e^{-756 / 480} = 0,79.$$

Расчеты сопротивления излучения и КПД антенны произведены без учета влияния наведенных сопротивлений от других сторон ромбической антенны.

Эквивалентный радиус провода ромба для области острого угла  $r_s = \sqrt{4 \cdot 2} = 2,83$  мм. Входное сопротивление одного полотна ромба равно волновому сопротивлению ромба вблизи острого его угла и определяется (13.12). Для  $\lambda_0 = 22$  м

$$W_0 = 276 \lg(\lambda \sin \varphi / 2\pi r) - 69 = \\ = 276 \lg(22 \cdot 10^3 \sin 25^\circ / 2 \cdot 3,14 \cdot 2,83) - 69 = 679 \text{ Ом.}$$

Мощность, выделяемая на поглощающей линии,

$$P_{пл} = P(1 - \eta_a) = P(1 - 0,79) = 0,21P.$$

Пример 13.5. Определить диапазон использования антенны РГД(65/4)1,  $\lambda_0 = 12,5$  м при работе под углом в вертикальной плоскости  $\Delta = 18^\circ$ , если принять допустимым уменьшение коэффициента усиления на краях диапазона до 30.

Решение. По кривой для  $\Delta = 18^\circ$  рис. 13.5 для значений  $G = 30$  находим  $\lambda/\lambda_0 = 0,86$  и 1,7. Следовательно,  $\lambda_{min} = 0,86\lambda_0 = 0,86 \cdot 12,5 = 10,8$  м;  $\lambda_{max} = 1,7\lambda_0 = 1,7 \cdot 12,5 = 21,3$  м.

Пример 13.6. Выбрать тип приемной антенны и определить ее основные размеры для работы на трассе протяженностью 800 км.

Решение. В соответствии с табл. 13.3 определим тип рекомендуемой антенны БС 2 (14/11) (200/4,5) 11.

Антенна состоит из двух полотен. В каждом полотне 14 симметричных вибраторов с длиной плеча 11 м. Расстояние между

вибраторами 4,5 м, высота подвеса 11 м. Длина полотна антенны  $L = (n-1)d = (14-1)4,5 = 58,5$  м. Сопротивления связи — по 200 Ом в каждом плече.

Пример 13.7. Определить напряжение на входе приемника, развиваемое антенной БС 2 (21/8) (200/4,5) 25 при работе на волне 20 м. Угол прихода волны в вертикальной плоскости  $7^\circ$ . Фидер имеет волновое сопротивление 208 Ом, коэффициент полезного действия 60%. Напряженность поля 100 мкВ/м.

Решение. По графику рис. 13.6 находим для волны 20 м КПД, равный 0,53, и КНД — 115.

Коэффициент усиления антенны (6.16)

$$G = D\eta_a/1,64 = 115 \cdot 0,53/1,64 = 37,1.$$

Действующая длина антенны (13.26)

$$L_x = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{GW_\phi \eta_\phi}{73,1}} = \frac{20}{3,14} \sqrt{\frac{37,1 \cdot 208 \cdot 0,6}{73,1}} = 50 \text{ м.}$$

Напряжение на входе согласованного приемника

$$U_{\text{вх}} = 0,5L_x E = 0,5 \cdot 50 \cdot 100 = 2500 \text{ мкВ.}$$

Пример 13.8. Определить улучшение отношения сигнал/помеха за счет применения антенны БС 2(21/8) (200/4,5) 17 на волне 20 м, если в горизонтальной плоскости сигнал приходит с главного направления приема  $\varphi = 0$ , а помеха — под углом  $18^\circ$ . В вертикальной плоскости углы прихода сигнала и помехи равны.

Решение. Для волны 20 м коэффициент укорочения волны в антенне находим по рис. 3.6:  $\xi = 0,99$ .

Значения множителя характеристики направленности в горизонтальной плоскости определим по (13.24) и (13.22):

$$F(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin \varphi) - \cos kl \sin [0,5nkd(\xi - \cos \varphi)]}{\cos \varphi} \cos(0,5kD_1 \sin \varphi),$$

где  $kl = 360 \cdot 8/20 = 144^\circ$ ;  $kd = 360 \cdot 4,5/20 = 81^\circ$ ;  $nkd = 21 \cdot 81 = 1701^\circ$ ;  $0,5kD_1 = 0,5 \cdot 360 \cdot 25/20 = 225^\circ$ .

Для полезного сигнала множитель характеристики направленности

$$F_c(\varphi) = \frac{\cos 0^\circ - \cos 144^\circ \sin [850^\circ (0,99 - \cos 0^\circ)]}{\cos 0^\circ} \cos(225^\circ \sin 0^\circ) = 1,81.$$

Для помехи множитель характеристики направленности

$$F_n(\varphi) = \frac{\cos(144^\circ \sin 15^\circ) - \cos 144^\circ \sin [850^\circ (0,99 - \cos 15^\circ)]}{\cos 15^\circ} \times$$

$$\times \cos(225^\circ \sin 15^\circ) = 1,46 \cdot 0,893 \cdot 0,526 = 0,686.$$

Используя (9.6), определим коэффициент помехозащитности

$$K_{\text{п.з}} = 20 \lg \frac{F_c(\varphi)}{F_n(\varphi)} = 20 \lg \frac{1,81}{0,686} = 8,4 \text{ дБ.}$$

Пример 13.9. Определить основные размеры антенны для радиовещания в круговой зоне радиусом до 1000 км (см. рис. 13.7)

при работе на волне 50 м. Фидер симметричный, двухпроводный с волновым сопротивлением 600 Ом.

Решение. Собственное сопротивление излучения каждого волнового вибратора в соответствии с табл. 7.1 равно 200 Ом. Сопротивление связи между волновым вибратором и его зеркальным отображением (учет влияния земли) найдем по кривым рис. 8.3. Для  $l/\lambda = 0,5$  и  $d/\lambda = 2H/\lambda = 0,3$  находим  $R_{12} = 70$  Ом. Полное сопротивление излучения волнового вибратора с учетом влияния земли  $R_{\Sigma \text{п}} = R_{11} - R_{12} = 200 - 70 = 130$  Ом.

Влиянием других вибраторов можно пренебречь. Расстояние между вибраторами значительно больше высоты их подвеса над землей. В этом случае сопротивления, наведенные соседним вибратором и его зеркальным отображением, будут компенсировать друг друга.

Распределительные фидеры от вибраторов до магистрального фидера имеют длины, равные половине длины волны. Входное сопротивление такого отрезка линии равно его сопротивлению нагрузки. Для согласования антенны с фидером необходимо, чтобы входное сопротивление каждого вибратора было равно  $4W_\phi = 4 \cdot 600 = 2400$  Ом. Необходимое входное сопротивление вибратора получим подбором его волнового сопротивления. Решая (7.24) относительно волнового сопротивления, имеем

$$R_a = W_a^2/R_{\Sigma \text{п}}; W_a = \sqrt{R_a R_{\Sigma \text{п}}} = \sqrt{2400 \cdot 130} = 559 \text{ Ом.}$$

Решая (7.18) относительно  $\lg(l/r_s)$ , имеем

$$W_a = 276 \lg(l/r_s) - 120; \lg(l/r_s) = (W_a + 120)/276 = 2,46; l/r_s = 288.$$

Определим эквивалентный радиус вибратора. При  $l \approx 0,5\lambda$   $r_s = l/288 = 25/288 = 0,868$  м.

Выполним вибратор из двух проводов диаметром 6 мм. Учитывая, что  $r_s = \sqrt{hr}$ , получим  $h = r_s^2/r = 86,8^2/3 = 2500$  мм. Расстояние между проводами вибратора 2,5 м.

Коэффициент укорочения волны в волновом вибраторе определим по кривой 2 рис. 7.1. Для  $l/r = 288$  имеем  $\xi = 1,13$ .

Строительная длина плеча вибратора  $l = 0,5\lambda/\xi = 0,5 \cdot 50/1,13 = 22,124$  м.

Стрела провеса вибратора  $f = (0,05 \div 0,07)D = 0,06 \cdot 50 = 3$  м.

Строительная высота мачт  $H_m = H + f = 0,15 \cdot 50 + 3 = 10,5$  м.

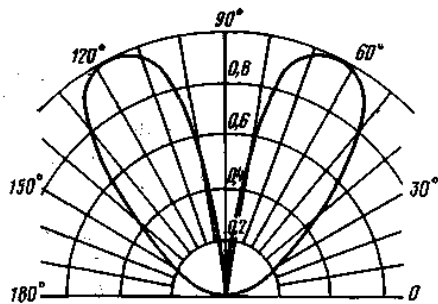
Параметры антенны, необходимые для расчета характеристики направленности антенны,

$$0,5kD = 0,5 \cdot 360 \cdot 50/50 = 180^\circ; kH = 360 \cdot 0,15 = 54^\circ.$$

Расчет характеристики направленности в вертикальной плоскости, проходящей через центры двух вибраторов и перпендикулярной им, определим по формуле (13.31):

$$F(\Delta) = \sin(0,5kD \cos \Delta) \sin(kH \sin \Delta).$$

Расчет характеристики направленности антенны дан в табл. 13.4, диаграмма направленности антенны, выполненная в полярных координатах, приведена на рис. 13.8.



**Задача 13.1.** Определить длину плеча ВГД и его высоту подвеса по заданному диапазону рабочих частот и углу максимального излучения в вертикальной плоскости для средней (геометрической) частоты диапазона.

Рис. 13.8. Диаграмма направленности антенны примера 13.9

Таблица 13.4

Расчет характеристики направленности антенны примера 13.9

$\Delta, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$0,5 kd \cos \Delta$	180	117	169	156	138	116	90	61,5	31,5	0
$k H \sin \Delta$	0	9,4	18,5	27	34,7	41,3	46,6	50,6	33	54
$\sin(0,5 kd \cos \Delta)$	0	0,05	0,19	0,40	0,67	0,89	1	0,87	0,51	0
$\sin(kH \sin \Delta)$	0	0,16	0,32	0,45	0,57	0,66	0,72	0,77	0,80	0,81
$F(\Delta)$	0	0,01	0,06	0,18	0,38	0,59	0,725	0,68	0,41	0
$F(\Delta)_н$	0	0,01	0,08	0,25	0,52	0,81	1	9,93	0,58	0

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f, \text{ МГц}$	9,1—17,6	6,05—11,7	5,05—9,8	4,55—8,8	3,64—7,05	3,03—5,9
$\Delta, \text{ град}$	15	19	20	29	40	43

**Задача 13.2.** К антенне ВГД с длиной плеча 15 м, волновым сопротивлением 400 Ом подводится мощность 10 кВт. Определить эффективные значения токов и напряжений в пучностях, если задана рабочая частота.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f, \text{ МГц}$	12	11	10	9	8	7

**Задача 13.3.** Выбрать тип антенны для передачи программ радиовещания и определить ее основные размеры по заданной протяженности трассы и диапазону рабочих волн.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r, \text{ км}$	3000	3500	1500	1300	800	700
$\lambda, \text{ м}$	25—31	11—16	14—25	31—50	16—31	41—74

**Задача 13.4.** Антенна СГД (4/4)РА имеет  $\lambda_0=26 \text{ м}$  и  $H_н=0,5\lambda_0$ . Определить коэффициент усиления антенны при работе под углом  $\Delta=10^\circ$  и  $\varphi=10^\circ$  на заданной частоте.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f, \text{ МГц}$	14,4	11,5	8,9	7,3	6,5	12,5

**Задача 13.5.** Заданы протяженность трассы и диапазон рабочих частот. Выбрать тип антенны и определить ее основные размеры для передачи в системе радиосвязи.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$r, \text{ км}$	6000	5000	4000	3000	1500	3500
$f, \text{ МГц}$	14,3—24	5,35—9,4	15—8,56	17—30	9,7—17	6,12—10,7

**Задача 13.6.** Определить диапазон волн, в котором коэффициент усиления антенны не падает ниже 40, если заданы угол излучения в вертикальной плоскости и строительная длина волны антенны.

Вариант	а	б	в	г	д
Тип	РГД(65/4)1	РГД(65/4)1	РГД(70/6)1,25	РГД(70/6)1,25	РГД(65/4)1
$\lambda_0, \text{ м}$	15	25	25	40	12,5
$\Delta, \text{ град}$	16	18	12	15	16

**Задача 13.7.** Для ромбической антенны определить длину двухпроводной поглощающей линии, выполненной из фехраля, если известны диаметр провода, волновое сопротивление поглощающей линии и длина волны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$d, \text{ мм}$	1	1,2	1,5	1,5	1,4	1,6
$W_{п.л.}, \text{ Ом}$	600	600	350	300	340	360
$\lambda, \text{ м}$	12	15	15	30	20	25

**Задача 13.8.** Определить действующую длину антенны БС 2(21/8) (200/4,5)17, если заданы частота и угол прихода волны в вертикальной плоскости. Фидер приемной антенны имеет волновое сопротивление 208 Ом и  $\eta=70\%$ .

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f, \text{ МГц}$	10	15	18,7	5	10	15
$\Delta, \text{ град}$	18	15	9	24	24	18

## ГЛАВА 14

### АНТЕННЫ ГЕКТОМЕТРОВЫХ И КИЛОМЕТРОВЫХ ВОЛН

#### 14.1. ВВЕДЕНИЕ

Диапазоны СЧ и НЧ используются для радиосвязи и передачи программ звукового вещания главным образом поверхностной волной. Увеличение радиуса зоны обслуживания достигается применением на частотах выше 500 кГц антенн с антифединговыми свойствами. Антифединговыми называют антенны, имеющие максимум излучения вдоль земной поверхности и существенно ослабленное излучение под углами, большими  $40^\circ$  в вертикальной плоскости. Для работы поверхностной волной используют вертикальную поляризацию.

#### 14.2. АНТЕННЫ С НИЖНИМ ПИТАНИЕМ

Антенны нижнего питания представляют собой вертикальный несимметричный вибратор. Если в качестве излучения используется металлическая мачта, то она ставится на опорный изолятор. Расчет параметров антенн с нижним питанием выполняют по формулам (7.12)—(7.27).

При определении ряда параметров пользуются эквивалентной длиной антенны

$$l_3 = H + l_{3,r}, \quad (14.1)$$

где  $H$  — длина вертикальной части (высота);  $l_{3,r}$  — эквивалентная длина горизонтальной части, определяется (14.2) и (14.3):

$$\operatorname{ctg} kl_{3,r} = -X_r/W_B; \quad X_r = -1/\omega C_r. \quad (14.2); (14.3)$$

Здесь  $X_r$  — входное сопротивление горизонтальной части;  $W_B$  — волновое сопротивление вертикальной части;  $C_r$  — емкость горизонтальной части.

Волновое сопротивление вертикальной антенны-мачты определяют по (7.20) или (7.21), в которых радиус  $r$  заменяют эквивалентным радиусом

$$r_3 = R \sqrt[n]{nr/R}, \quad (14.4)$$

где  $n$  — число углов в сечении мачты;  $R$  — радиус окружности, описанной вокруг сечения мачты;  $r$  — радиус вертикальных труб или стержней, из которых выполнена мачта.

Сопротивление излучения несимметричных антенн определяется по рис. 7.2. Сопротивление излучения длинноволновых антенн, расположенных над хорошо проводящей землей, определяется по известной действующей длине:

$$R_{\Sigma a} = 1600 (L_d/\lambda)^2. \quad (14.5)$$

При вертикальной поляризации в диапазонах СВ, ДВ и СДВ действующую длину антенны часто называют действующей высотой.

Для настройки антенной цепи в резонанс последовательно с антенной при  $l_3 < 0,25\lambda$  включают индуктивность (удлинительную)

$$L_{уд} = (W_B/\omega) \operatorname{ctg} ka'l = -X_a/\omega \quad (14.6)$$

и при  $0,25\lambda < l_3 < 0,5\lambda$  — емкость (укорачивающую)

$$C_{ук} = (-\operatorname{tg} ka'l_3)/\omega W_B = 1/\omega X_a. \quad (14.7)$$

Эффективное значение тока входа антенны

$$I_{a,эфф} = \sqrt{P/R_a}. \quad (14.8)$$

Напряжение на входе антенны

$$U_a = I_a Z_a. \quad (14.9)$$

Напряжение в пучности антенны (на ее конце)

$$U_{п} = (I_a W_B \cos kl_{3,r}) / \cos kl_r \sin kl_3. \quad (14.10)$$

Полоса пропускания

$$2\Delta f = \frac{2f R_a}{|X_L| + |X_C| + \frac{W_B k H}{\sin^2 kl_3} + \frac{W_B^2 \cos kl_{3,r}}{X_r \sin^2 kl_3}}. \quad (14.11)$$

где  $|X_L|$  и  $|X_C|$  — модули реактивных сопротивлений настройки;  $X_r = -1/\omega C_r$  — емкостное сопротивление горизонтальной части или

зонта. При отсутствии горизонтальной части  $X_r = \infty$  и последнее слагаемое знаменателя в (14.7) обращается в нуль.

Вертикальная антенна с нижним питанием без горизонтальной части имеет антифединговый диапазон

$$\lambda_{аф} = (1,66 \div 1,88) H \quad (14.12)$$

и рабочий диапазон волн

$$\lambda = (1,45 \div 8,3) H. \quad (14.13)$$

Мачты рекомендуется применять в соответствии с табл. 14.1. Типовые мачты состоят из отдельных секций длиной 4,5—7,5 м.

Таблица 14.1

Решетчатые мачты трехгранного сечения для антенн средних и длинных волн

Тип	Облегченные	Типовые	Инвентарные
Материал	Круглая сталь	Стальные трубы	Стальные трубы
Диаметр, мм	50	168	219
Высота, м	45—120	100—250	150—400
Сторона сечения, м	0,8	1,35	2,2

### 14.3. АНТЕННЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТОКА (АРРТ)

Типовые антенны АРРТ имеют высоты 150, 204 и 257 м. Антифединговый диапазон волн АРРТ

$$\lambda_{аф} = (0,92 \div 2,25) H. \quad (14.14)$$

Рабочий диапазон волн АРРТ

$$\lambda = (0,89 \div 5,6) H. \quad (14.15)$$

Длина шлейфа регулировки тока АРРТ  $L_1$ , обеспечивающая антифединговую диаграмму направленности, выбирается в соответствии с рис. 14.1. Характеристика направленности АРРТ в вертикальной плоскости рассчитывается по формуле

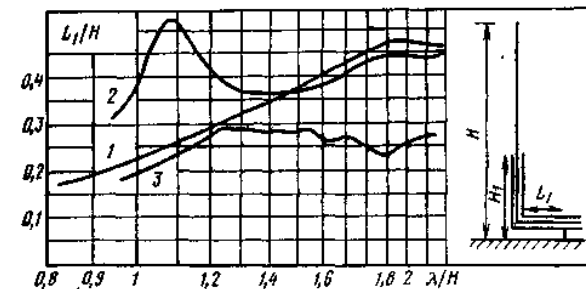


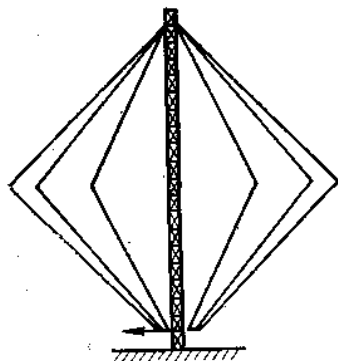
Рис. 14.1. Зависимость длины шлейфа регулировки тока АРРТ от длины волны: 1 —  $H_1 = 0,4 H$ ;  $W_B = 170 \text{ Ом}$ ; 2 —  $H_1 = 0,33 H$ ;  $W_B = 170 \text{ Ом}$ ; 3 —  $H_1 = 0,4 H$ ;  $W_B = 115 \text{ Ом}$

$$F(\Delta) = \{ [\cos(kH_1 \sin \Delta) \sin kH - \sin k(H-H_1) - \sin kH \times \\ \times \cos(kH \sin \Delta)] \sin \psi + [\cos(kH \sin \Delta) \cos kH_1 - \cos kH \times \\ \times \cos(kH_1 \sin \Delta)] \cos \psi \} : \cos \Delta \sin[k(H-H_1)], \quad (14.16)$$

где  $H$  — высота мачты;  $H_1$  — высота экрана;  $\Psi$  определяется из уравнения  $\operatorname{tg} \Psi = (W_1/W_2) \operatorname{tg} kL_1$ ;  $W_1$  и  $L_1$  — волновое сопротивление и длина шлейфа регулировки тока;  $W_2$  — волновое сопротивление антенны.

#### 14.4. ШУНТОВАЯ АНТЕННА-МАЧТА

Диапазонная шунтовая антенна-мачта представляет собой заземленную металлическую мачту, установленную на фундамент без опорного изолятора. В систему излучения антенны включены верхние части оттяжек верхнего яруса и наклонные провода, идущие от середины оттяжек верхнего яруса к основанию мачты, где эти провода подключаются к фидеру или элементам настройки (рис. 14.2). Шунтовые антенны-мачты антифидинговыми свойствами не обладают. Высота шунтовой антенны-мачты выбирается в пределах



$$H = (0,15 \div 0,5) \lambda. \quad (14.17)$$

Рабочий диапазон шунтовой антенны-мачты  
 $\lambda = (2 \div 6,6) H. \quad (14.18)$

#### 14.5. АНТЕННА С ВЕРХНИМ ПИТАНИЕМ

Входное сопротивление антенны на верхнем ее конце

$$Z_a = R_a + i(W_2 \operatorname{tg} kH - 1/\omega C_{ш}), \quad (14.19)$$

Рис. 14.2. Шунтовая антенна-мачта

где  $C_{ш}$  — емкость «шапки» антенны;  $R_a$  — активная составляющая сопротивления антенны, состоящая из сопротивления излучения и сопротивления потерь.

#### 14.6. ЗАЗЕМЛЕНИЯ АНТЕНН

Заземления антенн мощных передающих станций выполняют из большого числа (обычно 120) радиальных лучей медного провода диаметром 2—4 мм или стальных оцинкованных шин сечением  $2 \times 10$  мм<sup>2</sup>, уложенных в землю на глубину 20—30 см. У основания антенны лучи привариваются к сборным шинам. Длина лучей берется примерно равной высоте мачты или несколько больше.

Сопротивление, обусловленное потерями в заземлении антенны,

$$R_{п} = A\lambda/\lambda_0, \quad (14.20)$$

где  $\lambda_0$  — резонансная длина волны или волна, для которой известен коэффициент  $A$ ;  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $A$  — коэффициент, имеющий размерность сопротивления и зависящий от каче-

ства заземления. Коэффициент  $A$  часто определяется измерениями. При хорошем заземлении  $A = 0,5 \div 2$  Ом.

#### 14.7. РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ

Рабочие антенны выполняются преимущественно одновитковыми с периметром рамки  $p \leq 0,1 \lambda_{нор}$ . По сравнению с Г-образной или штыревой рамочной антенной менее чувствительна к помехам, источник которых является электрическим диполем и расположен на небольшом расстоянии от места приема.

Действующая длина рамочной антенны

$$L_d = 2\pi nS/\lambda, \quad (14.21)$$

где  $n$  — число витков в рамке;  $S$  — площадь рамки.

Сопротивление излучения рамки, расположенной непосредственно над хорошо проводящей почвой

$$R_{\Sigma} = 640\pi^4 n^2 S^2 / \lambda^4. \quad (14.22)$$

Малое сопротивление излучения обуславливает низкий коэффициент полезного действия и делает нерациональным использование рамочных антенн в качестве передающих.

Индуктивность одновитковой рамки, мкГ, выполненной из тонкого провода, определяется по формуле

$$L = 0,4 \pi R \left( \ln \frac{8R}{r} - 2 \right), \quad (14.23)$$

где  $R$  — радиус рамки, м;  $r$  — радиус провода, м.

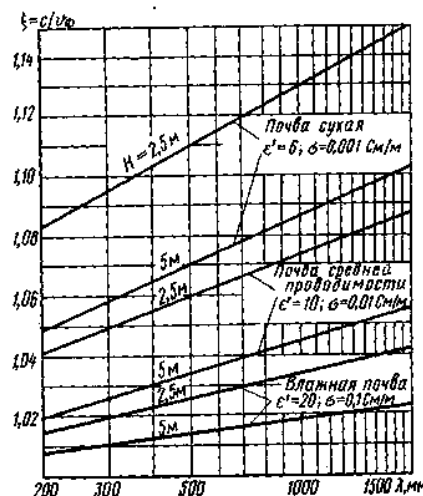
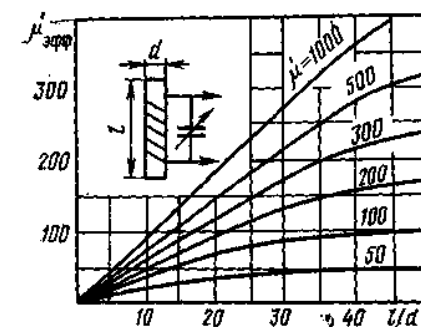
Действующая длина рамки с магнитодиэлектрическим сердечником (ферритовая антенна), образующая резонансный контур,

$$L_d = nkS\mu'_{эфф} Q, \quad (14.24)$$

где  $S$  — площадь сечения сердечника, м<sup>2</sup>;  $\mu'_{эфф}$  — относительная эффективная магнитная проницаемость сердечника, определяемая по кривым рис. 14.3;  $Q$  — добротность антенного контура.

Рис. 14.4. Зависимость коэффициента укорочения волны ОБ от высоты подвеса, параметров почвы и длины волны

Рис. 14.3. Зависимость относительной магнитной эффективной проницаемости сердечника от его размеров





Сердечники для антенн километровых и гектометровых волн применяют с относительной магнитной проницаемостью, равной 400—600, декаметровых волн — около 100, метровых и более коротких волн — 10. Для обеспечения необходимой полосы пропускания добротность антенного контура на частотах 150—1600 кГц ограничивают соответственно значениями 15—50.

#### 14.8. ОДНОПРОВОДНАЯ АНТЕННА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Антенна представляет собой провод длиной  $(0,5—6)\lambda$ , подвешенный на высоте 1,5—5 м над землей. Один конец антенны подключается к несимметричному фидеру, второй конец через сопротивление 480—550 Ом заземляется. Характеристика направленности антенны в горизонтальной плоскости при приеме поверхностной волны рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \cos \varphi \frac{\sin [0,5 kL (\xi - \cos \varphi)]}{\xi - \cos \varphi}, \quad (14.25)$$

где  $L$  — длина провода антенны;  $\xi$  — коэффициент укорочения волны в антенне, определяется по кривым рис. 14.4.

Оптимальная длина антенны определяется уравнением

$$L_{\text{опт}} = 0,5\lambda / (\xi - \cos \Delta). \quad (14.26)$$

При длине антенны больше оптимальной коэффициент направленного действия антенны уменьшается. При приеме поверхностной волны в (14.26) принимаем  $\Delta = 0$ . Длина антенны, работающей в диапазоне волн, определяется наиболее короткой волной диапазона. Антенну рекомендуется применять при почвах средней и плохой проводимости. Однопроводная антенна бегущей волны имеет обозначение ОБЛ/Н, например ОБ 2000/2,5 означает, что данная антенна имеет длину 2000 м и высоту подвеса 2,5 м.

#### 14.9. ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЧНАЯ АНТЕННА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Антенна представляет собой систему из вертикальных вибраторов с горизонтальной частью (Т-образных) или без нее. Вибраторы с нижнего конца подключаются непосредственно к несимметричной собирательной линии с волновым сопротивлением 160 Ом. Антенна имеет обозначение БВН  $(n/H)(b/d)$ , где  $n$  — число несимметричных вибраторов;  $H$  — высота вибраторов, м;  $2b$  — длина горизонтальной части, м;  $d$  — расстояние между вибраторами, м. Рекомендуется применять антенну без горизонтальной части — БВН(15/8) (0/71,5) и антенну с горизонтальной частью — БВН(15/8) (20/71,5).

Характеристика направленности антенны в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \frac{\sin [0,5 nk d (\xi - \cos \varphi)]}{n \sin [0,5 kd (\xi - \cos \varphi)]}. \quad (14.27)$$

В вертикальной плоскости при идеальной проводимости почвы характеристика направленности рассчитывается по формуле

$$F(\Delta) = \cos \Delta \frac{\sin [0,5 nk d (\xi - \cos \Delta)]}{n \sin [0,5 kd (\xi - \cos \Delta)]}, \quad (14.28)$$

где  $\xi$  — коэффициент укорочения волны в антенне. Для антенн без горизонтальной части  $\xi = 1,02$ .

В антеннах с горизонтальной частью ( $b=20$  м) при  $\lambda=200$  м  $\xi=1,16$ ; при  $\lambda=300$  м,  $\xi=1,11$ ; при  $\lambda=400$  м  $\xi=1,1$ ; в диапазоне 500—2000 м  $\xi=1,09$ .

Антенны БВН рекомендуется применять в зоне ближнего фединга на расстоянии 50—200 км от передающей станции. При работе в диапазоне 200—600 м рекомендуется БВН(15/8) (0/71,5), а в диапазоне 400—2000 м — БВН(15/8) × (20/71,5).

Пример 14.1. Выбрать размер вертикальной антенны без горизонтальной части для работы на частоте 1200 кГц и определить ее основные параметры. Сопротивление потерь, отнесенное к пучности тока,  $R_{\text{п}}=4$  Ом, мощность, подводимая к антенне, 100 кВт.

Решение. Из (14.12) определим высоту мачты

$$H = \frac{\lambda}{1,66 + 1,88} = \frac{255}{1,66 + 1,88} = 132 \div 150 \text{ м.}$$

В соответствии с табл. 14.1 выбираем типовую трехгранную мачту со стороны сечения 1,35 м, диаметром труб 168 мм. Взяв 18 секций по 7,5 м, получим высоту мачты 135 м.

Радиус окружности, описанной вокруг трехгранного сечения мачты,

$$R = l/2 \sin \pi/n = 1,35/2 \sin 60^\circ = 0,78 \text{ м.}$$

Эквивалентный радиус мачты (14.4)

$$r_s = R \sqrt[3]{nr/R} = 0,78 \sqrt[3]{3 \cdot 0,084/0,78} = 0,55 \text{ м.}$$

Волновое сопротивление мачты (7.21)

$$W_s = 138 \lg(\lambda/\pi r_s) - 34 = 138 \lg(250/3,14 \cdot 0,55) - 34 = 265 \text{ Ом.}$$

Сопротивление излучения найдем по графику рис. 7.2. Отношение  $l/\lambda = H/\lambda = 135/250 = 0,54$  соответствует  $R_{\Sigma \text{п}} = 80$  Ом.

Полное активное сопротивление, отнесенное к пучности тока,  $R_{\text{а.п}} = 80 + 4 = 84$  Ом.

Коэффициент укорочения волны определим по кривой 2 рис. 7.1. Для  $l/r = H/r_s = 135/0,55 = 245$  имеем  $\xi = 1,13$ .

Электрическая длина антенны  $k_a l = 360 \cdot 1,13 \cdot 135/250 = 218^\circ$ .

Входное сопротивление антенны определим по (7.22):

$$Z_a = \frac{R_{\text{а.п}}}{(R_{\text{а.п}}/W_s)^2 + \sin^2 k_a H} - i \frac{0,5 W_s \sin 2 k_a H}{(R_{\text{а.п}}/W_s)^2 + \sin^2 k_a H} = \\ = \frac{84}{(84/265)^2 + \sin^2 218^\circ} - i \frac{0,5 \cdot 265 \sin 436^\circ}{(84/265)^2 + \sin^2 218^\circ} = 175 - i 131 \text{ Ом.}$$

Эффективное значение тока в пучности антенны

$$I_{\text{п.эфф}} = \sqrt{P/R_{\text{а.п}}} = \sqrt{100\,000/84} = 34,5 \text{ А.}$$

Эффективное значение тока на входе антенны

$$I_{\text{а.эфф}} = I_{\text{п.эфф}} \sin k_a H = 34,5 \sin 218^\circ = 21,2 \text{ А.}$$

Эффективное значение напряжения на входе антенны

$$U_{\text{а.эфф}} = I_{\text{п.эфф}} Z_a = 21,2 \sqrt{175^2 + 131^2} = 4650 \text{ В.}$$

Эффективное значение напряжения на конце (в пучности) антенны

$$U_{п.эфф} = I_{п.эфф} W_B = 34,5 \cdot 256 = 9142 \text{ В.}$$

Амплитудное значение напряжения в пучности при пике модуляции ( $M=100\%$ ).

$$U_{max} = 2\sqrt{2}U_{п.эфф} = 2,82 \cdot 9142 = 25780 \text{ В.}$$

Индуктивность катушки настройки антенны (14.6)

$$L_{уд} = X_a / \omega = 131 / 6,28 \cdot 1,2 \cdot 10^6 = 17,38 \cdot 10^{-6} \text{ Г} = 17,38 \text{ мкГ.}$$

Пример 14.2. Выбрать антенну с регулируемым распределением тока для работы на частотах  $f_1=1130$  кГц ( $\lambda_1=265$  м) и  $f_2=367$  кГц ( $\lambda_2=817$  м). Волновое сопротивление шлейфа регулировки тока  $W_1=130$  Ом.

Решение. Проверим возможность использования АРРТ высотой  $H=204$  м с волновым сопротивлением 170 Ом. Для  $f_2$  отношение  $\lambda_2/H=817/204=4$  и для  $f_1$  отношение  $\lambda_1/H=1,3$ . Используя (14.14) и (14.15), заключаем, что при работе на частоте 1130 кГц антенна обладает антифединговой диаграммой направленности, частота 367 кГц лежит в области рабочих частот. Длину шлейфа регулировки тока при работе на частоте 1130 кГц определим по кривой 2 рис. 14.1. Отношению  $\lambda_1/H=1,3$  соответствует  $L_1/H=0,37$ . Длина шлейфа регулировки тока  $L_1=0,37 \cdot 204=75,5$  м. Фазовый угол  $\Psi \text{ tg } \Psi = (W_1/W_B) \text{ tg } k_a L_1 = (130/170) \text{ tg } (360 \cdot 75,5/265) = -3,6$ ,  $\Psi=106^\circ$ .

При работе на частоте 367 кГц экран заземляется непосредственно у основания мачты и  $L_1=0$ .

Пример 14.3. Шунтовая антенна-мачта имеет высоту 204 м. Определить диапазон рабочих частот.

Решение. Используя (14.18), определим диапазон рабочих волн

$$\lambda = (2 \div 6,6) H = (2 \div 6,6) 204 = 408 \div 1346 \text{ м.}$$

Данному диапазону волн соответствуют частоты 223—735 кГц.

Пример 14.4. Антенна с верхним питанием высотой  $H=150$  м и волновым сопротивлением  $W_B=250$  Ом имеет емкость зонта («шапки»)  $C_r=400$  пФ. Определить реактивную составляющую входного сопротивления, отнесенного к верхнему концу на частоте 300 кГц (1000 м).

Решение. Реактивную составляющую входного сопротивления антенны на ее верхнем конце определим по (14.19):

$$X_a = W_a \text{ tg } \kappa H - 1/\omega C_r = 250 \text{ tg } (360^\circ \cdot 150/1000) - 1/6,28 \cdot 300 \cdot 400 \cdot 10^{-12} = 980 \text{ Ом.}$$

Большая реактивная составляющая входного сопротивления существенно сузит полосу пропускания антенны.

Пример 14.5. Антенна выполнена в виде наклонного под углом  $\Theta=45^\circ$  к поверхности земли луча длиной 70 м. Определить

параметры антенны при работе на частоте 1000 кГц, если известны: сопротивление заземления  $R_n=5$  Ом, погонная емкость антенны  $C'_1=5$  пФ/м.

Решение. Действующая длина антенны (7.16)

$$L_d = (1/k) \text{ tg } (0,5kl) \sin \Theta = (300/2 \cdot 3,14) \text{ tg } (0,5 \cdot 360^\circ \cdot 70/300) \times \sin 45^\circ = 30,4 \text{ м.}$$

Сопротивление излучения (14.5)

$$R_{\Sigma a} = 1600(L_d/\lambda)^2 = 1600(30,4/300)^2 = 16,4 \text{ Ом.}$$

Волновое сопротивление антенны (6.20)

$$W_B = 3333/C'_1 = 3333/5 = 667 \text{ Ом.}$$

Коэффициент укорочения волны в антенне найдем по кривой 1 рис. 7.1. Для тонкого провода, когда  $l \gg r$ ,  $\xi=1,04$ .

Входное сопротивление антенны (7.23)

$$Z_a = R_{a.ш} / \sin^2 k_a l - i W_B \text{ ctg } k_a l = (16,4 + 5) / \sin^2 (360^\circ \cdot 1,04 \cdot 70/300) - i 667 \text{ ctg } 87^\circ = 21,6 - i 35 \text{ Ом.}$$

Индуктивность катушки настройки (удлинительной) антенны

$$L_{уд} = -X_a / \omega = 35 / 6,28 \cdot 10^6 = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ Г} = 6,6 \text{ мкГ.}$$

Пример 14.6. Магнитодиэлектрическая антенна имеет 55 витков, расположенных на сердечнике диаметром 12 мм, длиной 240 мм с относительной магнитной проницаемостью 500. Определить действующую длину антенны при работе на волне 200 м, если добротность антенного контура  $Q=50$ .

Решение. Для  $l/d=240/12=20$  и  $\mu=500$  по кривым рис. 14.3 находим  $\mu'_{эфф}=140$ . Действующая длина антенны (14.24)

$$L_d = nkS\mu'_{эфф}Q = 55 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 3,14 \cdot 0,0006^2 \cdot 140 \cdot 50/200 = 1,38 \text{ м.}$$

Пример 14.7. Выбрать размеры однопроводной антенны бегущей волны для приема поверхностной волны ( $\Delta=0$ ) в диапазоне 500—1600 кГц (187—600 м). Почва имеет параметры:  $\epsilon'=6$ ;  $\sigma=0,001$  См/м.

Решение. Антенну выполним из провода диаметром 3 мм, подвешенным на высоте 2,5 м. Длина антенны не должна превышать оптимальную длину. Для короткой волны диапазона определим по кривой для «сухой почвы» рис. 14.4 коэффициент укорочения волны  $\xi=1,08$ . Оптимальная длина антенны (14.26).

$$L_{опт} = 0,5\lambda / (\xi - \cos \Delta) = 0,5 \cdot 200 / (1,08 - 1) = 1250 \text{ м.}$$

Пример 14.8. Определить ослабление помехи за счет применения антенны БВН(15/8) (0/71,5) на волне 400 м, если в горизонтальной плоскости сигнал приходит с главного направления ( $\varphi_c=0$ ), а помеха под углом  $\varphi_n=25^\circ$ .

Решение. По (14.27) определим значения множителей характеристики направленности антенны для сигнала и помехи

$$0,5 nkd = 0,5 \cdot 15 \cdot 360^\circ \cdot 71,5/400 = 482,6^\circ; 0,5 kd = 0,5 \cdot 360^\circ \cdot 71,5/400 = 32,17^\circ;$$

$$F(\varphi_0) = \frac{\sin [0,5 nkd (\xi - \cos \varphi_0)]}{n \sin [0,5 kd (\xi - \cos \varphi_0)]} = \frac{\sin [482,6^\circ (1,02 - \cos 0^\circ)]}{15 \sin [32,17^\circ (1,02 - \cos 0^\circ)]} = 1;$$

$$F(\varphi_n) = \frac{\sin [482,6^\circ (1,02 - \cos 25^\circ)]}{15 \sin [32,17^\circ (1,02 - \cos 25^\circ)]} = 0,496.$$

Коэффициент помехозащищенности (9.6)

$$K_{\text{пз}} = 20 \lg [F(\varphi_0)/F(\varphi_n)] = 20 \lg (1/0,496) = 6 \text{ дБ.}$$

**Пример 14.9.** Определить направления «нулевого» приема в горизонтальной плоскости антенны БВН(15/8) (0/71,5) при работе на частоте 1 МГц (300 м).

**Решение.** Для определения направления «нулевого» приема используем (8.16):

$$\cos \varphi_0 = \xi - M\lambda/nd, \text{ где } M = 1, 2, 3, \dots$$

Задавая различные значения  $M$ , определим углы, соответствующие «нулевым» приемам. Результаты расчета следующие:

$M$	1	2	3	4	5	6	7	8
$M\lambda/nd$	0,28	0,56	0,84	1,12	1,40	1,68	1,96	2,24
$\cos \varphi_0$	0,74	0,46	0,18	-0,10	-0,38	-0,66	-0,94	-1,22
$\varphi_0$ , град	42,1	62,5	84,6	95,5	112	131	160	—

**Задача 14.1.** Определить волновое сопротивление вертикальной антенны-мачты с нижним питанием решетчатой конструкции, если известны число граней ее сечения, диаметр труб, база (длина стороны сечения) и высота мачты.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Число граней	3	4	3	4	3	4
Диаметр труб, мм	219	50	168	168	50	219
База, м	2,2	0,8	1,35	1,35	0,8	2,2
Высота мачты, м	300	105	165	210	120	270

**Задача 14.2.** Антенна с нижним питанием имеет высоту 150 м, волновое сопротивление вертикальной части 250 Ом. К верхнему концу мачты подключена горизонтальная часть с емкостью  $C_T = 410$  пФ. Определить действующую длину антенны, если известна частота.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , КГц	416	400	380	350	333	300

**Задача 14.3.** Известны входное сопротивление антенны и частота. Определить величину индуктивности или емкости элемента настройки антенны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$Z_a$ , Ом	60+i75	34-i100	40-i50	150+i150	20-i150	10+i10
$f$ , кГц	1000	600	650	800	500	720

**Задача 14.4.** Известны входное сопротивление антенны и подводимая к ней мощность. Определить напряжение и ток на входе антенны.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$Z_a$ , Ом	35-i20	40+i10	100+i40	15-i100	15-i150	5-i200
$P$ , кВт	100	100	500	250	75	120

**Задача 14.5.** Определить рабочий и антифединговый диапазон частот вертикальной антенны-мачты с нижним питанием без горизонтальной части, если известна высота мачты.

Вариант	а	б	в	г	д	е
Высота, м	105	135	150	202,5	225	255

**Задача 14.6.** Выбрать высоту АРРТ, если заданы две рабочие частоты. Антенна должна иметь минимальную высоту, но на более высокой частоте обладать антифединговой диаграммой направленности в вертикальной плоскости.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f_1$ , кГц	600	670	1500	650	1200	700
$f_2$ , кГц	250	300	500	240	360	220

**Задача 14.7.** Определить длину шлейфа регулировки тока АРРТ по условиям задачи 14.6, если  $H_1 = 0,4H$  и  $W_b = 170$  Ом.

**Задача 14.8.** Антенна с магнитоэлектрическим сердечником имеет длину сердечника 200 мм, диаметр 10 мм и  $\mu' = 1000$ . Добротность антенного контура 25, число витков 200. Определить действующую длину антенны и полосу пропускания, если задана частота.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , кГц	500	410	350	290	240	200

**Задача 14.9.** Однопроводную антенну бегущей волны предполагается выполнить из провода диаметром 3 мм с высотой подвеса 2,5 м. Определить оптимальную длину антенны для приема поверхностной волны, если задана частота. Почва имеет параметры  $\epsilon' = 6$ ;  $\sigma = 0,001$  См/м.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , кГц	300	333	429	500	600	750

## ГЛАВА 15

### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

#### 15.1. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИДЕРОВ

В воздушных линиях без заполнения диэлектриком коэффициент укорочения волны равен 1. Коэффициент укорочения волны коаксиального фидера определяется по (10.16). Для коаксиального кабеля, внутреннее пространство которого полностью заполнено диэлектриком, коэффициент укорочения волны

$$\xi = \sqrt{\epsilon'}, \quad (15.1)$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика кабеля.

Измерение коэффициента укорочения волны в кабеле заключается в определении резонансной частоты короткозамкнутого на конце образца (отрезка) кабеля длиной  $l$ . Параллельное подключение образца к катушке индуктивности измерительного резонансного контура приводит к изменению резонансной частоты. Изменяя частоту генератора, добиваются положения, когда подключение и отключение образца не требуют изменения емкости конденсатора контура для настройки его в резонанс. Зная частоту генератора и длину образца кабеля, определяют коэффициент укорочения волны по формуле

$$\xi = 0,25c/lf, \quad (15.2)$$

где  $c$  — скорость света;  $l$  — длина образца, м;  $f$  — частота, Гц.

При измерении  $\xi$  внешний проводник образца должен подключаться к концу катушки, имеющему «нулевой» потенциал.

Погонная емкость определяется путем измерения емкости на относительно низкой частоте образца кабеля, разомкнутого на конце. Зная емкость образца  $C$  и его длину  $l$ , определяют погонную емкость

$$C_1 = C/l. \quad (15.3)$$

Волновое сопротивление фидера рассчитывается по погонной емкости  $C_1$  и коэффициенту укорочения:

$$W_\phi = 3333\xi/C_1, \quad (15.4)$$

где  $C_1$  — в пФ/м.

Коэффициент полезного действия фидера определяется по формуле

$$\eta_\phi = U_{\min k} U_{\max n} / U_{\min n} U_{\max k}, \quad (15.5)$$

где  $U_{\min k}$  и  $U_{\max k}$  — напряжение соответственно в минимуме и максимуме вблизи конца фидера;  $U_{\min n}$  и  $U_{\max n}$  — напряжение соответственно в минимуме и максимуме вблизи начала фидера.

Метод не обладает высокой точностью, поскольку напряжения в начале фидера зависят также от отражений, вызванных неоднородностью фидера (изоляторов в точках крепления и т. д.).

Измерение потенциалов (напряжений) на фидере можно производить приборами тепловой, термоэлектрической или детекторной системы. Приборы тепловой и термоэлектрической систем боятся перегрузок, часто выходят из строя, имеют относительно малую чувствительность и предназначены для измерения токов. Приборы с детектором при малых уровнях измеряемых величин имеют квадратичные характеристики, при высоких уровнях — близкие к линейным. При измерениях на фидерах передающих станций характеристики прибора с детектором (диодом) можно считать линейными. Тепловые и термоэлектрические приборы имеют относительно малую чувствительность и предназначены для измерения токов. Для измерения напряжения амперметр подключает-

ся к фидеру через измерительный трансформатор, представляющий собой отрезок линии длиной  $0,25\lambda$ .

Ток через прибор и напряжение на входе трансформатора связаны уравнением

$$I_{\text{пр}} = U/W_{\text{н}}, \quad (15.6)$$

где  $W_{\text{н}}$  — волновое сопротивление измерительного трансформатора.

Входное сопротивление измерительного прибора (без учета потерь в измерительном трансформаторе)

$$R_{\text{вх}} = W_{\text{н}}^2/R_{\text{пр}}. \quad (15.7)$$

Чем меньше внутреннее сопротивление прибора  $R_{\text{пр}}$ , тем больше входное сопротивление и меньше влияния приборов на измеряемую цепь.

## 15.2. СОГЛАСОВАНИЕ ФИДЕРА С АНТЕННОЙ

Согласование возможно посредством четвертьволнового трансформатора. Если известны волновое сопротивление фидера и естественный (измеренный до согласования) коэффициент бегущей волны в нем, то волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора

$$W_{\text{тр}} = W_{\text{д}} \sqrt{K_{\text{б.в.}}} \quad (15.8)$$

Данный трансформатор имеет длину  $0,25 \lambda_{\text{тр}}$  и располагается от первого минимума напряжения на фидере вблизи антенны по направлению к генератору (передатчику). Конструктивно трансформатор представляет собой участок фидера, параллельно проходам которого подвешены дополнительные провода для понижения волнового сопротивления.

При работе на одной частоте, согласование осуществляют реактивным шунтом. Место подключения шунта к фидеру определяется уравнением

$$\text{ctg } kz = \sqrt{K_{\text{б.в.}}}, \quad (15.9)$$

а длина короткозамкнутого шлейфа настройки — уравнением

$$\text{tg } kl_{\text{ш}} = (W_{\text{ф}}/W_{\text{ш}}) \sqrt{K_{\text{б.в.}}}/(1-K_{\text{б.в.}}), \quad (15.10)$$

где  $z$  — расстояние от положения максимума напряжения на фидере вблизи антенны по направлению к генератору до места подключения шлейфа настройки;  $l_{\text{ш}}$  — длина короткозамкнутого шлейфа настройки;  $W_{\text{ф}}$ ,  $W_{\text{ш}}$  — волновые сопротивления фидера и шунта настройки.

В условиях эксплуатации место подключения шунта настройки и его длину удобно определять по графикам рис. 15.1.

Антенны гектометровых и километровых волн можно согласовать с фидером посредством реактивных четырехполюсников (рис. 15.2), которые располагаются в антенных павильонах, установленных непосредственно у антенны. Расчет индуктивности и

емкости реактивного четырехполюсника производят по формулам:

$$L = (R_2/\omega) \sqrt{(R_1/R_2) - 1}, \quad (15.11)$$

$$C = (1/\omega R_1) \sqrt{(R_1/R_2) - 1}. \quad (15.12)$$

В случае, когда активное сопротивление антенны  $R_a$  больше волнового сопротивления фидера, полагают  $R_1 = R_a$  и  $R_2 = W_\phi$ .

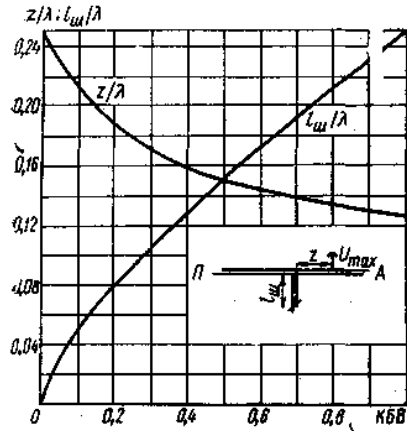
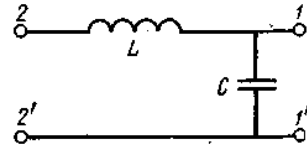


Рис. 15.1. Зависимость длины реактивного шлейфа настройки фидера и его места подключения от КВВ в фидере при  $W_\phi = W_{ит}$

Рис. 15.2. Реактивный четырехполюсник согласования антенны с фидером



При этом фидер подключают ко входу 2,2', а антенну — ко входу 1,1'. Если волновое сопротивление фидера больше активного сопротивления антенны, полагают  $R_1 = W_\phi$  и  $R_2 = R_a$ . В этом случае антенну подключают ко входу 2,2', а фидер — ко входу 1,1'.

### 15.3. СНЯТИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ

Минимальный радиус при снятии диаграмм направленности направленных антенн

$$r_{min} = (1 \div 2) L_a^2 / \lambda, \quad (15.13)$$

где  $L_a$  — горизонтальный размер антенны. Для синфазных антенн  $L_a = 0,5 n \lambda_0$ , ромбических антенн  $L_a = 2L \sin \Psi$ , для антенн бегущей волны  $L_a = (n-1)d$ .

При снятии диаграмм направленности слабонаправленных антенн или антенн-мачт с круговой диаграммой направленности минимальный радиус берут равным двум-трем длинам волн или равным двум-трем высотам антенны-мачты.

Пример 15.1. Определить азимут установки антенны и угол прихода волны в вертикальной плоскости при приеме стационарного спутника, находящегося на высоте 36 000 км над земной поверхностью с координатами  $0^\circ$  северной широты и  $99^\circ$  восточной долготы. Координаты пункта приема  $Ш = 52^\circ$  северной широты и  $L_2 = 108^\circ$  восточной долготы.

Решение. Используя уравнения (1.15) и (1.16), имеем  $\cos \Theta = \sin Ш_1 \sin Ш_2 + \cos Ш_1 \cos Ш_2 \cos (L_2 - L_1)$ .

В данном случае  $Ш_2 = 0$ ,  $\sin Ш_2 = 0$  и  $\cos Ш_2 = 1$ , следовательно,  $\cos \Theta = \cos Ш_1 \cos (L_2 - L_1) = \cos 52^\circ \cos (99^\circ - 108^\circ) = 0,608$ .

Центральный угол  $\Theta = 52,5^\circ$ .

$\sin \alpha = \cos Ш_2 \sin (L_2 - L_1) / \sin \Theta = \cos 0^\circ \sin (99^\circ - 108^\circ) / \sin 52,5^\circ = -11^\circ 22'$ .

Спутник расположен западнее пункта приема, следовательно, азимут установки антенны в пункте приема

$180^\circ - (-11^\circ 22') = 191^\circ 22'$ .

Используя (2.9) и (2.10), определим углы излучения и прихода волны:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_a \sin \Theta}{H_c + R_a (1 - \cos \Theta)} = \frac{6370 \sin 52,5^\circ}{36\,000 + 6370 (1 - \cos 52,5^\circ)} = 0,1313;$$

$$\varphi = 7^\circ 30' = 7,5^\circ.$$

Угол прихода волны в вертикальной плоскости

$$\Delta = 90^\circ - \Theta - \varphi = 90^\circ - 52,5^\circ - 7,5^\circ = 30^\circ.$$

Протяженность трассы (2.11)

$$r = R_3 \sin \Theta / \sin \varphi = 6370 \sin 52,5^\circ / \sin 7,5^\circ = 38\,730 \text{ км.}$$

Время запаздывания сигнала при распространении в одном направлении (2.12)

$$t_s = r/c = 38,73 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^8 = 0,13 \text{ с.}$$

Пример 15.2. Коаксиальный кабель со сплошной полиэтиленовой изоляцией ( $\epsilon' = 2,3$ ) длиной 10 м имеет емкость 670 пФ. Определить коэффициент укорочения волны и волновое сопротивление кабеля.

Решение. Коэффициент укорочения волны определим по (10.16), приняв в нем коэффициент заполнения  $a = 1$ :

$$\xi = \sqrt{1 + a(\epsilon' - 1)} = \sqrt{1 + 1(2,3 - 1)} = 1,52.$$

Погонная емкость кабеля  $C'_1 = C'/L = 670/10 = 67 \text{ пФ/м.}$

Волновое сопротивление кабеля (15.4)

$$W = 3333 \sqrt{\epsilon' / C'_1} = 3333 \sqrt{2,3 / 67} = 75,5 \text{ Ом.}$$

Пример 15.3. Коаксиальный кабель длиной 1 м подключается (и отключается) к колебательному контуру. При частоте 49,6 МГц подключение кабеля к контуру, ранее настроенному в резонанс, не требовало его подстройки. Определить коэффициент укорочения волны в кабеле.

Решение. Используя (15.2), имеем

$$\xi = 0,25c/lf = 0,25 \cdot 3 \cdot 10^8 / 1 \cdot 49,6 \cdot 10^6 = 1,51.$$

Диэлектрическая проницаемость кабеля (его диэлектрика)  
 $\epsilon' = \xi^2 = 1,51^2 = 2,28$ .

Скорость распространения энергии по кабелю  
 $v = c/\epsilon = 3 \cdot 10^8 / 1,51 = 1,98 \cdot 10^8$  м/с.

Пример 15.4. Входное сопротивление короткозамкнутого фидера —  $i 272$  Ом, разомкнутого  $+i 450$  Ом. Определить волновое сопротивление фидера.

$$W_{\phi} = \sqrt{-X_{\text{вх.н.з}} X_{\text{вх.р.к}}} = \sqrt{272 \cdot 450} = 350 \text{ Ом.}$$

Пример 15.5. Определить коэффициент полезного действия фидера, если напряжение в максимуме и минимуме у входа 1110 и 900 В, а у конца фидера 1050 и 810 В.

Решение. Используя (15.7), имеем

$$\eta_{\phi} = U_{\text{min н}} U_{\text{max к}} / U_{\text{min к}} U_{\text{max н}} = 810 \cdot 1050 / 900 \cdot 1110 = 0,85.$$

Пример 15.6. Определить мощность, подводимую к антенне по условиям примера 15.5, если волновое сопротивление фидера 600 Ом.

Решение

$$P = U_{\text{min}} U_{\text{max}} / W_{\phi} = 810 \cdot 1050 / 600 = 1420 \text{ Вт.}$$

Пример 15.7. Волновое сопротивление фидера и шлейфа настройки 600 Ом, коэффициент бегущей волны в фидере до настройки 0,7. Определить место включения короткозамкнутого шлейфа настройки и его длину при работе на волне 20 м.

Решение. Используя (15.9) и (15.10), имеем:

$$\text{ctg } kz = \sqrt{K_{6,в}} = \sqrt{0,7} = 0,836; \quad kz = 50^\circ; \quad z = 50 \cdot 20 / 360 = 2,78 \text{ м;}$$

$$\text{tg } kl_{\text{ш}} = (W_{\phi} / W_{\text{ш}}) \sqrt{K_{6,в}} / (1 - K_{6,в}) = (600 / 600) \sqrt{0,7} / (1 - 0,7) = 2,79;$$

$$kl_{\text{ш}} = 70,3^\circ; \quad l_{\text{ш}} = 70,3 \cdot 20 / 360 = 3,9 \text{ м.}$$

Проверим результаты расчета по графикам рис. 15.1. Для КБВ = 0,7  $l_{\text{ш}}/\lambda = 0,195$ ;  $l_{\text{ш}} = 0,195 \cdot 20 = 3,9$  м;  $z/\lambda = 0,14$ ;  $z = 0,14 \cdot 20 = 2,8$  м. Результаты дают хорошее совпадение. Графиками рис. 15.1 удобно пользоваться при выполнении расчетов непосредственно на антенном поле.

Пример 15.8. При работе на частоте 400 кГц входное сопротивление антенны равно 15 Ом. Определить параметры реактивного четырехполюсника согласования антенны с фидером, имеющим волновое сопротивление 60 Ом.

Решение. Используя (15.11), (15.12) и полагая  $R_1 = W_{\phi}$ ,  $R_2 = R_a$ , определим параметры четырехполюсника:

$$L = \frac{R_2}{\omega} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{15}{6,28 \cdot 4 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{60}{15} - 1} = 1,034 \cdot 10^{-5} \text{ Г,}$$

$$C = \frac{1}{\omega R_1} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{1}{6,28 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 60} \sqrt{\frac{60}{15} - 1} = 1,15 \cdot 10^{-8} \text{ Ф.}$$

Параметры четырехполюсника: индуктивность 10,34 мкГ, емкость 11,5 нФ. Антенна подключается ко входу 22' (см. рис. 15.2), фидер — ко входу 11'.

Пример 15.9. При работе на частоте 1 МГц входное сопротивление антенны  $Z_a = 225 + i 100$  Ом. Определить параметры реактивного четырехполюсника согласования антенны с фидером, имеющим волновое сопротивление 75 Ом.

Решение. Для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления антенны индуктивного характера необходимо последовательно с антенной включить емкость. Используя (14.7), имеем

$$C_{\text{ук}} = 1/\omega X_a = 1/6,28 \cdot 10^6 \cdot 100 = 1,59 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 1590 \text{ пФ.}$$

Используя (15.12) и (15.13) и полагая  $R_1 = R_a$ ,  $R_2 = W_{\phi}$ , определим параметры четырехполюсника:

$$L = \frac{R_2}{\omega} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{75}{6,28 \cdot 10^6} \sqrt{225/75 - 1} = 16,88 \cdot 10^{-9} \text{ Гн,}$$

$$C = \frac{1}{\omega R_1} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 225} \sqrt{225/75 - 1} = 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Параметры четырехполюсника: индуктивность 16,88 мкГн, емкость 1 нФ. Антенна последовательно через конденсатор емкостью 1,59 нФ подключается к зажимам 11' реактивного четырехполюсника (см. рис. 15.2), а фидер — к зажимам 22'.

Пример 15.10. Определить эффективные значения токов и напряжений на реактивных элементах настройки по условиям примера 15.9, если мощность, подводимая к антенне, 200 кВт.

Решение. Ток антенны

$$I_a = \sqrt{P/R_a} = \sqrt{200\,000/225} = 29,8 \text{ А.}$$

Ток фидера

$$I_{\phi} = \sqrt{P/W_{\phi}} = \sqrt{200\,000/75} = 51,6 \text{ А.}$$

Напряжение на катушке индуктивности

$$U_L = \omega L I_{\phi} = 6,28 \cdot 10^6 \cdot 16,88 \cdot 10^{-9} \cdot 51,6 = 5470 \text{ В.}$$

Напряжение на конденсаторе реактивного четырехполюсника

$$U_C = I_a R_a = 29,8 \cdot 225 = 6700 \text{ В.}$$

Напряжение на конденсаторе настройки антенны

$$U_{\text{ук}} = I_a X_{\text{ук}} = 29,8 \cdot 100 = 2980 \text{ В.}$$

Напряжение на входе антенны

$$U_a = I_a \sqrt{R_a^2 + X_a^2} = 29,8 \sqrt{225^2 + 100^2} = 7340 \text{ В.}$$

Эффективные значения токов и напряжений определены для режима несущей частоты при согласованном фидере. В пике модуляции ( $m=1$ ) эффективные значения напряжений удваиваются.

**Пример 15.11.** Определить эффективные значения токов и напряжений на реактивных элементах четырехполюсника согласования по условиям примера 15,8, если мощность, подводимая к антенне, 100 кВт.

**Решение.** Токи антенны и фидера:

$$I_a = \sqrt{P/R_a} = \sqrt{100\,000/15} = 81,6 \text{ А};$$

$$I_\phi = \sqrt{P/W_\phi} = \sqrt{100\,000/60} = 40,8 \text{ А}.$$

Напряжение на зажимах 22' реактивного четырехполюсника  $U_2 = I_a R_a = 81,6 \cdot 15 = 1224 \text{ В}$ .

Падение напряжения на катушке индуктивности,

$$U_L = I_a \omega L = 81,6 \cdot 6,28 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 10,34 \cdot 10^{-6} = 2120 \text{ В}.$$

Напряжение на конденсаторе и фидере

$$U_C = U_\phi = \sqrt{P/W_\phi} = \sqrt{100\,000 \cdot 60} = 2450 \text{ В}.$$

Эффективные значения токов и напряжений определены для режима несущей частоты при согласованном фидере.

Ток конденсатора

$$I_C = U_\phi \omega C = 2450 \cdot 6,28 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 11,5 \cdot 10^{-9} = 70,7 \text{ А}.$$

**Пример 15.12.** Двухпроводный фидер выполнен проводом диаметром 4 мм с расстоянием между проводами 400 мм и нагружен антенной. Коэффициент бегущей волны в фидере равен 0,5. Определить размеры четвертьволнового трансформатора для повышения коэффициента бегущей волны в фидере.

**Решение.** Волновое сопротивление двухпроводного фидера (10.8)

$$W_\phi = 276 \lg(2D_1/d) = 276 \lg(2 \cdot 400/4) = 635 \text{ Ом}.$$

Волновое сопротивление трансформатора согласования (15.8)

$$W_{тр} = W_\phi \sqrt{K_{б.в.}} = 635 \sqrt{0,5} = 449 \text{ Ом}.$$

Согласующий трансформатор выполним четырехпроводным путем параллельного подключения к проводам фидера дополнительных проводов длиной  $0,25\lambda$ . Волновое сопротивление четырехпроводного трансформатора определяется (10.9):

$$W_{тр} = 138 \lg[(2D_1/dD_2) \sqrt{D_1^2 + D_2^2}].$$

По данному уравнению на рис. 15.3 построен график зависимости волнового сопротивления четырехпроводного фидера (трансформатора) от расстояний между однополярными и разнополярными проводами. Из рис. 15.3 следует, что при диаметре проводов 4 мм волновому сопротивлению 449 Ом и расстоянию между разнополярными проводами 400 мм соответствует расстояние между однополярными проводами 45 мм. Трансформатор представляет собой два провода, подключенные параллельно двум проводам фидера на расстоянии 45 мм. Это расстояние может

быть фиксировано проволочными перемычками, устанавливаемыми на расстоянии 1—2 м друг от друга по длине трансформатора. Трансформатор располагается от положения первого минимума напряжения на фидере вблизи антенны по направлению к передатчику.

**Задача 15.1.** Определить азимут установки антенны и угол прихода волны в вертикальной плоскости при приеме геосинхронного спутника, находящегося на высоте 36 000 км над земной поверхностью, если известны координаты пункта приема (1) и спутника (2).

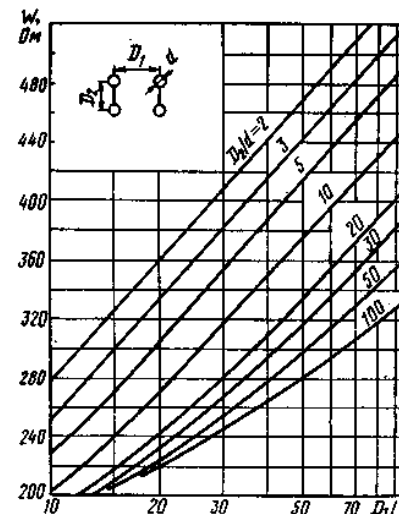


Рис. 15.3. Зависимость волнового сопротивления четырехпроводного фидера от расстояния между однополярными и разнополярными проводами по данным примера 15.12

Вариант	а	б	в	г	д	е
Широта 1	65 С	52 С	56 С	50 С	52 С	43 С
Долгота 1	102 В	104 В	94 В	80 В	108 В	77 В
Широта 2	0	0	0	0	0	0
Долгота 2	100 В	95 В	90 В	85 В	100 В	90 В

**Задача 15.2.** Известны длина отрезка кабеля и частота, при которой подключение этого отрезка к резонансному контуру не вызывает его расстройки. Определить коэффициент укорочения и скорость распространения волны по кабелю.

Вариант	а	б	в	г	д	е
L, м	2	3	2	3,5	4	6
f, МГц	25	16,5	24,7	14,2	12,5	8,4

**Задача 15.3.** Известно входное сопротивление фидера при холостом ходе и коротком замыкании. Определить волновое сопротивление фидера.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$X_{вх.к.з.}, \text{ Ом}$	-220	490	-600	62,5	-50	-680
$X_{вх.х.х.}, \text{ Ом}$	408	-250	204	-90	89	530

**Задача 15.4.** Известны: волновое сопротивление, эффективное значение напряжения в максимуме на фидере и КБВ в нем. Определить мощность, передаваемую по фидеру.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W_\phi, \text{ Ом}$	600	300	75	60	240	300
$U_{макс}, \text{ кВ}$	10,6	15,0	3,53	3,85	10,95	12,0
$K_{б.в.}$	0,8	0,85	0,9	0,8	0,9	0,85

**Задача 15.5.** Известны: частота, волновое сопротивление

шлейфа настройки, волновое сопротивление фидера и КБВ в нем. Определить место включения и длину индуктивного шлейфа настройки (согласования).

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W_{ш}$ , Ом	600	600	600	600	600	600
$W_{ф}$ , Ом	600	300	600	300	600	300
$K_{б.в}$	0,4	0,3	0,35	0,4	0,45	0,4
$f$ , МГц	15	13,6	7,5	8,82	6,66	6,00

Задача 15.6. Известны: волновое сопротивление фидера и КБВ в нем. Определить волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора согласования.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$W_{ф}$ , Ом	600	300	600	300	600	300
$K_{б.в}$	0,4	0,3	0,35	0,4	0,3	0,35

Задача 15.7. Фидер выполнен проводом диаметром 4 мм с расстоянием между разнополярными проводками 400 мм. Определить расстояние между однополярными проводками четырехволнового трансформатора согласования, если известен КБВ в фидере до согласования.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$K_{б.в}$	0,4	0,35	0,48	0,45	0,50	0,55

Задача 15.8. Известны: частота, входное сопротивление антенны и волновое сопротивление фидера. Определить параметры реактивного четырехполосника согласования.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$f$ , кГц	300	500	800	1000	1200	1400
$R_{вх}$ , Ом	35	85	200	150	140	130
$X_{вх}$ , Ом	-15	120	100	-50	-50	-40
$W_{ф}$ , Ом	75	75	60	60	75	75

Задача 15.9. Определить эффективные значения токов и напряжений на реактивных элементах настройки по условиям задачи 15.8, если дополнительно известна мощность, подводимая к антенне.

Вариант	а	б	в	г	д	е
$P$ , кВт	100	150	200	100	150	200

## ГЛАВА 16

### ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

#### 16.1. ЗАДАЧИ И ТЕМЫ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Заключительным этапом обучения в техникуме является дипломное проектирование. Цель которого — систематизировать и закрепить знания учащихся в области, определенной темой дипломного проекта, развить навыки самостоятельной работы. Уча-

щиеся специальностей 0701 и 0706 могут выполнять дипломное проектирование по темам, включающим разделы курса распространения радиоволн и антенно-фидерные устройства. Темы дипломных проектов должны быть актуальными, соответствовать современному состоянию и перспективам развития науки и техники. При выборе тем рекомендуется учитывать реальные потребности производственно-технических управлений министерства связи и характер будущей работы дипломника.

По характеру темы дипломных проектов могут быть:

а) расчетно-конструкторскими, в которых ставится задача разработки нового антенно-фидерного устройства с заданными параметрами или дать рекомендации по реконструкции существующего;

б) проверочными, когда требуется просчитать параметры и характеристики существующего устройства в новом режиме или диапазоне частот и дать заключение о целесообразности использования данного устройства в новых условиях работы;

в) комплексными, охватывающими расчет антенно-фидерного устройства и определение напряженности поля в заданных направлениях;

г) исследовательскими, выполняемыми по направлениям научных исследований учебного заведения или предприятия связи.

#### 16.2. СОСТАВ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

Дипломный проект должен включать следующие составные части: титульный лист, задание на дипломное проектирование, рецензию, отзыв руководителя, аннотацию, расчетно-пояснительную записку, приложение (не обязательно), список используемой литературы, оглавление.

Титульный лист выдается руководителем дипломного проекта. При оформлении титульного листа дипломник, а также руководитель, консультанты и рецензент ставят свои подписи слева от разборчиво написанных соответствующих фамилий и инициалов.

Задание на дипломное проектирование, составленное и подписанное руководителем, должно содержать название темы, срок сдачи законченного проекта, исходные данные к проекту (эксплуатационно-технические данные), содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, подлежащих разработке, и срок их выполнения), перечень графического материала с точным указанием обязательных к исполнению чертежей, фамилии руководителя и консультантов.

Расчетно-пояснительная записка пишется от руки на одной стороне листа формата  $A_4$ —210×297 мм, допустим формат 203×288 мм, чернилами или пастой темного цвета (черного или синего). Записка может быть отпечатана лично автором на пишущей машинке с крупным очком через два интервала с лентой черного цвета. Написанный текст должен иметь поля следующих размеров: верхнее — 20 мм, правое — 10 мм, нижнее — не менее 20 мм и левое — не менее 25 мм. Заголовки сверху и снизу от-



деляются от текста тремя интервалами. Абзацевый отступ должен быть равен пяти знакам. Все страницы записки в правой верхней части должны иметь сквозную последовательную нумерацию арабскими цифрами от титульного листа до последней страницы, включая все иллюстрации и таблицы, расположенные внутри текста или после него. На титульном листе, который является первой страницей, номер страницы не ставится, хотя подразумевается.

Весь материал дипломного проекта разделяют на главы и параграфы. Каждая глава начинается с новой страницы и имеет порядковый номер. Параграфы имеют порядковый номер в пределах каждой главы. Номер параграфа состоит из номера главы, номера параграфа, разделенных точкой и заканчивающегося точкой, например 3.2. Слово «параграф» или знак § не ставится. При ссылке на литературные источники приводится порядковый номер по списку литературы, заключенный в квадратные скобки, например [4]. Все иллюстрации должны выполняться на листах форматом 210×297 мм. Если иллюстрация превышает данный формат, она складывается до размера листа. Все иллюстрации (рисунки) нумеруются арабскими цифрами с указанием главы и номера рисунка в данной главе, например рис. 2.7. Если в тексте требуется привести ссылки и на математические выражения (формулы), то последние нумеруются: первая цифра — номер главы, затем через точку — порядковый номер формулы в данной главе. Номер заключается в круглые скобки и размещается на правом поле нижней строки формулы, к которой он относится, например (3.6).

### 16.3. ПРИМЕР ЗАДАНИЯ НА ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Тема проекта: Антенно-фидерное устройство передающей телевизионной станции в городе А.

Исходные данные к проекту: мощность передатчика  $P$ , кВт; диапазон рабочих частот 542—550 МГц (номер телевизионного канала 30); коэффициент усиления антенны  $G$ , дБ (относительно полуволнового вибратора); вид поляризации — линейная вертикальная (или горизонтальная); высота установки антенны  $H$ , м; сечение опоры в месте установки антенны  $500 \times 500$  мм<sup>2</sup>; волновое сопротивление коаксиального фидера 75 Ом; минимально допустимый коэффициент бегущей волны в фидере 0,85. Могут быть и дополнительные требования, например неравномерность характеристики направленности в горизонтальной плоскости.

Содержание расчетно-пояснительной записки:

1. Сравнительная оценка передающих телевизионных антенн, выбор типа антенны.
2. Выбор основных конструктивных размеров антенны.
3. Расчет параметров и характеристик антенны.
4. Выбор фидера и расчет его параметров.
5. Техничко-экономическое обоснование проекта.
6. Охрана труда. Мероприятия по технике безопасности, производственной санитарии, пожарной профилактике, грозозащите.

7. Заключение.

8. Список использованной литературы.

Графическая часть:

1. Широкополосные вибраторы (иллюстрационные чертежи к первой главе записки).
2. Эскизы панели и антенны.
3. Схема питания антенны.
4. Характеристики антенны.
5. Техничко-экономическое обоснование.

### 16.4. ПРИМЕРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

В первой главе рассматриваются способы обеспечения широкой полосы рабочих частот различными вибраторами: Ж-образным, симметричным вибратором с пониженным волновым сопротивлением. Учитывая потребность относительно узкой полосы (менее 1,5%), делается вывод о возможности применения, например, полуволновых вибраторов в панельной антенне с синфазным питанием.

В последующих главах по заданному КУ выбирается число этажей панельной антенны. По заданной полосе для средней частоты определяются основные размеры элементов панели. Учитывая сечение опоры, определяется расстояние от фазового центра панели до геометрического центра, вокруг которого расположены панели (вертикальной оси опоры). Далее рассчитываются сопротивление излучения, входные сопротивления, укорочение вибраторов. При определении сопротивления излучения методом наведенных ЭДС можно в первом приближении ограничиться учетом вибраторов только одной панели и их зеркальных отображений, обусловленных наличием рефлектора. Характеристики направленности в горизонтальной плоскости рассчитываются для случая синфазного и переменного фазного питания. В зависимости от желания получить более равномерное излучение или лучшее согласование выбирают схему питания, выбирают типы распределительных фидеров (кабелей) и их длины с учетом коэффициентов укорочения волны в них, тип магистрального фидера, определяются потери в металле фидера.

*Общие замечания.* При выборе размеров любой антенны исходят из ее возможности работы в заданном диапазоне. Желательно выбирать фидеры и антенны типовых размеров, рекомендованных табл. 10.1, 11.1, 13.1—13.3, 14.1.

При проектировании радиорелейных систем связи сантиметрового диапазона выбор высот антенны рекомендуется производить из условия чистоты первой зоны Френеля (1.12), т. е. чтобы никакие наземные объекты (строения, деревья, возвышенности) не попадали в радиус первой зоны.

При дециметровых и метровых волнах чистота первой зоны Френеля не является необходимым условием, величину чистого просвета можно ограничить условием  $b \geq 0,288 \sqrt{\lambda L}$ .

При работе над дипломным проектом кроме указанной в списке литературы желательно использовать журналы «Электросвязь» и сборники «Антенны», издаваемые в изд. «Связь».

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

### Глава 1

- 1.1 а  $E_d=20$  мкВ/м, или 26 дБ.  
 1.2 а  $E_x=1$  мВ/м, или 60 дБ.  
 1.3 а  $e' < 60\lambda\sigma$ ;  $\delta=0,1086$ .  
 1.4 а  $\nu_{max}=25$  м.  
 1.5 а. Значения  $r_x=0$ ; 8; 16; 24 и 32 км соответствуют значения  $A_x=0$ ; 15; 20,1; 15 и 0 м.  
 1.6 а  $P=4,2$  мкВ/м<sup>2</sup>.  
 1.7 а  $P=588$  нВт/мм<sup>2</sup>.  
 1.8 а  $P=7$  Вт.  
 1.9 а  $e' > 60\lambda\sigma$ ;  $\delta=0,094$ .

### Глава 2

- 2.1 а. 68,23 км.  
 2.2 а.  $h_2/h_1=0,25$ ;  $q=0,05$ ;  $m=0,98$ ;  $\Delta l=3,53$  м.  
 2.3 а.  $h_2/h_1=0,2$ ;  $q=0,28$ ;  $m=0,98$ ;  $E_d=181$  мВ/м.  
 2.4 а.  $h_2/h_1=0,33$ ;  $q=1,37$ ;  $m=0,05$ ;  $E_d=1,13$  мВ/м.  
 2.5 а.  $f=202$  МГц;  $F=7 \cdot 10^{-4}$ ;  $E_d=4,28$  мкВ/м.  
 2.6 а.  $\varphi=5,5^\circ$ ;  $\Delta=49,5^\circ$ ; 3885 км.  
 2.7 а.  $t=0,126$  с.  
 2.8 а.  $\Delta=49,5^\circ$ ;  $F=0,99$ .

### Глава 3

- 3.1 а.  $f_{кр}=5$  МГц.  
 3.2 а.  $N=0,2 \cdot 10^8$  эл/см<sup>2</sup>.  
 3.3 а.  $f_{кр}=6,35$  МГц.  
 3.4 а.  $\sec \varphi=1,3$ ;  $\varphi_{кр}=39,7^\circ$ ;  $\Delta=47,2^\circ$ ;  $\Theta=6,2^\circ$ ;  $r=688$  км.  
 3.5 а.  $\Delta_1=5 \div 11^\circ$ ;  $\Delta_2=16 \div 21^\circ$ .  
 3.6 а.  $\Theta=9^\circ$ ;  $\Delta=18 \div 25^\circ$ ;  $\varphi=60^\circ$ .  
 3.7 а.  $F_2=4000$  — МПЧ 16 МГц;  $F_2=0$  — МПЧ 5 МГц;  $f_{МПЧ}=13$  МГц;  $f_{орч}=11$  МГц.  
 3.8 а. Местное время в точке отражения 10 час.;  $f_{крE}=3$  МГц;  $A_d=200$ ;  $V_{F_2}=0,8 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Gamma=1,53$ ;  $E=0,311$  мВ/м.  
 3.9 а.  $f_{крF_1}=5$  МГц;  $f_{крF_2}=4,5$  МГц.  
 3.10 а.  $N_1=25 \cdot 10^{10}$  эл/м<sup>2</sup>;  $N_2=30,9 \times 10^{10}$  эл/м<sup>2</sup>.  
 3.11 а.  $\Delta=9 \div 15^\circ$ .

### Глава 4

- 4.1 а.  $E_1=100$  мкВ/м, или 40 дБ;  $E=950$  мкВ/м, или 59,5 дБ.  
 4.2 а.  $E_1=100$  мкВ/м, или 40 дБ;  $E=895$  мкВ/м, или 59 дБ.  
 4.3 а.  $\lambda=0,26=0,375$ ;  $e^{-0,94}=0,39$ ;  $E_d=1,9$  мВ/м.  
 4.4 а.  $\lambda=3$  м;  $E_x=740$  мкВ/м, или 57,4 дБ.

### Глава 5

- 5.1 а.  $E_1=1$  мВ/м, или 60 дБ;  $E=8,35$  мВ/м, или 78,4 дБ.  
 5.2 а.  $\Theta=0,628$  рад ( $36^\circ$ );  $e^{-2,4}=4,2$ ;  $E=5,6$  мВ/м.  
 5.3 а.  $\lambda=4,545$  км;  $\Theta=0,471$  рад ( $27^\circ$ );  $E_d=90$  мкВ/м.

### Глава 6

- 6.1 а.  $D=35$ , или 15,4 дБ.  
 6.2 а.  $\lambda=18$  м;  $D=70$ ;  $S_{эфф}=-1805$  м<sup>2</sup>.  
 6.3 а.  $L_d=70$  м.  
 6.4 а.  $\eta=0,83$ .  
 6.5 а.  $T_a=72$  К.  
 6.6 а.  $\nu=0,66$ ;  $\lambda=7,5$  см;  $D=11160$ , или 40,48 дБ.  
 6.7 а.  $W_a=222$  Ом.

### Глава 7

- 7.1 а.  $W=350$  Ом;  $R_{\Sigma П}=60$  Ом.  
 7.2 а.  $W=270$  Ом;  $R_{\Sigma П}=2,5$  Ом.  
 7.3 а.  $\xi=1,08$ ;  $Z_a=60+i6$  Ом.  
 7.4 а.  $R_{\Sigma П}=2,5$  Ом;  $Z_a=5,8-i300$  Ом;  $\eta=0,9$ .  
 7.5 а.  $D=1,6$ .  
 7.6 а.  $L_d=115$  м.  
 7.7 а.  $C'_1=16,6$  пФ/м.  
 7.8 а.  $\xi=1,05$ .  
 7.9 а.  $\xi=1,1$ .

### Глава 8

- 8.1 а.  $Z_1=66-i50$  Ом;  $Z_2=84+i50$  Ом;  $Z_{12}=60-i10$  Ом.  
 8.2 а.  $m=0,61$ ;  $\Phi=140^\circ$ .  
 8.3 а.  $K_{зат}=3,6$ , или 5,6 дБ.  
 8.4 а.  $\sigma=0,175$ .

- 8.5.  $\lambda=20$  м;  $\Delta_M=12^\circ$ ;  $38^\circ 40'$ ;  $\Delta_0=24^\circ 35'$  и  $55^\circ 25'$ .  
 8.6 а.  $\varphi_0=30$  и  $90^\circ$ .

### Глава 9

- 9.1 а.  $P=22$  кВт;  $U=1,28$  мВ.  
 9.2 а.  $I=17$  мкА.  
 9.3 а.  $L_d=2,83$  м.

### Глава 10

- 10.1 а.  $U=3840$  В.  
 10.2 а.  $\eta=0,93$ .  
 10.3 а.  $\eta=0,87$ .  
 10.4 а.  $W=50$  Ом;  $\lambda_{кр}=14$  см.  
 10.5 а.  $R_1=0,212$  Ом/м.  
 10.6 а.  $W=50$  Ом.  
 10.7 а.  $\xi=1,45$ .  
 10.8 а.  $a \times b=72 \times 34$  мм<sup>2</sup>.  
 10.9 а.  $\alpha=0,02$  дБ/м.  
 10.10 а.  $D_2=200$  мм;  $R_1=0,095$  Ом/м;  $\alpha=1,35 \cdot 10^{-4}$ .  
 10.11 а.  $\eta=0,7$ .  
 10.12 а.  $D=18,5$  мм.

### Глава 11

- 11.1 а.  $\lambda_{ср}=63,5$  см;  $L_{РН}=508$  мм;  $L_{РЕ}=382$  мм;  $d_p=127$  мм;  $d_\phi=225 \div 300$  мм;  $d_s=317$  мм.  
 11.2 а.  $\lambda_{ср}=1,685$  м;  $L_{РН}=1348$  мм;  $L_{РЕ}=1348$  мм;  $d_p=500$  мм;  $d_\phi=930 \div 1000$  мм.  
 11.4 а.  $\Delta_0=30$  и  $90^\circ$ .  
 11.5 а. Потери в кабеле 2,88 дБ;  $L_d=3,54$  м;  $Z_a=35,4$  мВ;  $U_{ср}=-12,7$  мВ.  
 11.6 а.  $L=1180 \div 1230$  мм;  $S=138$  мм;  $n=9$ ;  $D_2=410$  мм;  $d=20-30$  мм.  
 11.7 а.  $\Delta f=494 \div 502$  МГц.  
 11.8 а.  $\Delta_0=30$  и  $90^\circ$ .

### Глава 12

- 12.1 а.  $\nu=0,64$ ;  $S=218$  см<sup>2</sup>;  $L_E=12$  см;  $L_H=18$  см;  $R_E \geq 14,4$  см;  $R_H \geq 21,6$  см.  
 12.2 а.  $D=48$ , или 16,8 дБ.  
 12.3 а.  $a \times b=40 \times 20$  мм<sup>2</sup>;  $R_H=-216$  мм;  $R_E=208$  мм.  
 12.4 а.  $\varphi_0=30$  и  $90^\circ$ .  
 12.6 а.  $D=288000$ , или 54,6 дБ.  
 12.7 а.  $\lambda=15$  см;  $\eta=0,8$ ;  $\eta_{обл}=0,8$ ;  $\nu_b=0,6$ ;  $D=1720$ , или 32,36 дБ.  
 12.8 а.  $D=3160$ ;  $\alpha=35^\circ$ ;  $R_2=3076$  мм;  $R_1=1656$  мм;  $f=1076$  мм.  
 12.9 а.  $S=74174$  см<sup>2</sup>;  $D=8380$ , или 39,2 дБ.

- 12.10 а.  $L_E=283$  см;  $\lambda=8,82$  см;  $\varphi_{обл}=1^\circ 46'$ .

### Глава 13

- 13.1 а.  $\lambda=17 \div 33$  м;  $l=10$  м;  $H=22,8$  м;  $\lambda_{ср}=23,6$  м.  
 13.2 а.  $l/\lambda=0,6$ ;  $R_{\Sigma П}=121$  Ом;  $U_{эфф}=3640$  В;  $I_{эфф}=9,1$  А.  
 13.3 а. СГД(4/4) РА;  $\lambda_0=26$  м;  $H_H=19,5$  м;  $l=10,14 \div 10,66$  м;  $d_s=13$  м;  $d_p=7-7,8$  м;  $d_s=0,91 \div 1,82$  м.  
 13.4 а.  $\lambda/\lambda_0=0,8$ ;  $G_{max}=170$ ;  $F(\Delta)=1$ ;  $F(\varphi)=0,6$ ;  $G=61,2$ , или 17,88 дБ.  
 13.5 а. РГД(70/6) 1,25;  $\lambda_0=15$  м;  $L=90$  м;  $H=18,75$  м;  $\Psi=70^\circ$ .  
 13.6 а.  $\lambda/\lambda_0=0,78 \div 1,5$ ;  $\lambda_p=11,7 \div 22,5$  м.  
 13.7 а.  $R_1=62$  Ом/м;  $L_{ПД}=24 \div 29$  м.  
 13.8 а.  $D=60$ ;  $\eta_a=0,38$ ;  $G=13,9$ ;  $L_d=50$  м.

### Глава 14

- 14.1 а.  $R_{от}=1,27$  м;  $R_2=1,024$  м;  $W=280$  Ом.  
 14.2 а.  $X_c=-933$  Ом;  $i_{р3}=30,5$  м;  $L_d=110$  м.  
 14.3 а.  $C_{нк}=2120$  пФ.  
 14.4 а.  $I_{эфф}=53,5$  А;  $Z_a=40,4$  Ом;  $U_a=2160$  В.  
 14.5 а.  $f_{эфф}=1522 \div 1724$  кГц;  $i_p=344 \div 1970$  кГц.  
 14.6 а.  $H=257$  м.  
 14.7 а.  $\lambda/H=1,94$ ;  $L_1/H=0,47$ ;  $L_1=120$  м.  
 14.8 а.  $l/d=20$ ;  $\mu'_{эфф}=200$ ;  $L_d=3,3$  м;  $=3,3$  м.  
 14.9 а.  $\xi=1,13$ ;  $L=3846$  м.

### Глава 15

- 15.1 а.  $\Theta=56^\circ 58'$ ;  $\alpha=2^\circ 23'$ ; азимут  $177^\circ 37'$ ;  $\Delta=25^\circ 12'$ .  
 15.2 а.  $\xi=1,5$ ;  $v=2 \cdot 10^8$  м/с.  
 15.3 а.  $W_\phi=300$  Ом.  
 15.4 а.  $P=15$  кВт.  
 15.5 а.  $L_{ш}=2,6$  м;  $z=3,2$  м.  
 15.6 а.  $W_{тр}=378$  Ом.  
 15.7 а.  $W_\phi=635$  Ом;  $W_{тр}=400$  Ом;  $D_2=120$  мм.  
 15.8 а.  $L_{сд}=7,96$  мкГ;  $L=21,23$  мкГ;  $C=8,09$  нФ.  
 15.9 а.  $I_a=53,5$  А;  $I_\phi=36,4$  А;  $U_L=1456$  В;  $U_C=U_\phi=2740$  В;  $U_a=4420$  В.

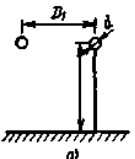
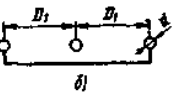

ПРИСТАВКИ К ОСНОВНЫМ И ПРОИЗВОДНЫМ ЕДИНИЦАМ

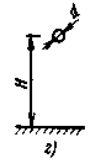
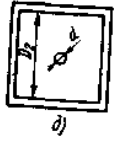
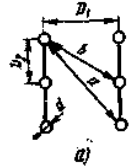
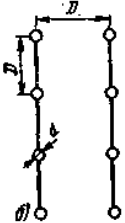
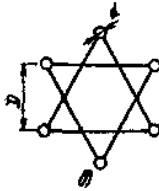
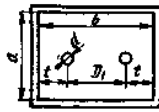
Отношение к основной или производной единице	Приставка		Отношение к основной или производной единице	Приставка	
	Наименование	Сокращенное обозначение		Наименование	Сокращенное обозначение
10 <sup>12</sup>	Тера	Т	10 <sup>-2</sup>	санти	с
10 <sup>9</sup>	Гига	Г	10 <sup>-3</sup>	милли	м
10 <sup>6</sup>	Мега	М	10 <sup>-6</sup>	микро	мк
10 <sup>3</sup>	кило	к	10 <sup>-9</sup>	нано	н
10 <sup>2</sup>	гекто	г	10 <sup>-12</sup>	пико	п
10	дека	да	10 <sup>-15</sup>	фемто	ф
10 <sup>-1</sup>	деци	д	10 <sup>-18</sup>	атто	а

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ФИДЕРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ИХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

(рис. П.1 — для несимметричных фидеров; рис. П.2 — для симметричных)

Сечение фидера	Формула расчета волнового сопротивления, Ом
	$W = 276 \frac{\lg(2H^2/D_1 d) \lg(2D_1/d)}{\lg(2H^2/D_1 d) + \lg(2D_1/d)}$
	$W = 69 \lg(4D_1^2/d^2)$
	$W = 172 \lg(1,14 D_2/d)$

1	2
	$W = 138 \lg(4H/d) \text{ при } H \gg d$
	$W = 138 \lg(1,078 D_2/d)$
	$W = 276 \frac{\lg \frac{D_1 a}{d D_2} + \lg \frac{b}{D_3} \lg \frac{D_1 D_2 a}{d b^2}}{\lg \frac{2 D_1 D_2}{d b}}$ $2 + \lg \frac{D_1 D_2 a}{d b^2} / \lg \frac{2 D_1 D_2}{d b}$
	$W = (276/n) \lg(2 \sqrt{n} D/d),$ <p>где <math>n</math> — число проводов</p>
	$W = 92 \lg(1,33 D/d)$
	$W = 276 \lg \frac{\text{th}(\pi t/a) \text{th}(0,5 \pi D_1/a)}{\text{th}(\pi d/a) \text{th}(0,5 \pi b/a)}$

1	2
 	$W = 120 \pi D/a$ при $D \ll a$  $W = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \left( \frac{2 D_1 D^2 - D_1^2}{d D^2 + D_1^2} \right)$ при $D/d > 4$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЕМКОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОВОДОВ**

Емкость одиночного горизонтального провода, расположенного параллельно поверхности земли,

$$C'_r = \frac{24 l}{\lg(2H/r)},$$

где  $C'_r$  — емкость горизонтального провода, пФ;  $l$  — длина провода, м;  $H$  — высота подвеса провода над землей, м;  $r$  — радиус провода, м.

Емкость системы из  $n$  горизонтальных проводов

$$C'_r = \frac{24 n l}{\lg \left[ \frac{2H}{r} \left( \frac{2H}{d} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right]},$$

где  $C'_r$  — емкость горизонтальных проводов, пФ;  $l$  — длина одного провода, м;  $H$  — высота подвеса проводов над землей, м;  $r$  — радиус проводов, м;  $d$  — расстояние между проводами, м;  $(n-1)! = (n-1)(n-2) \dots 1$ .

Емкость одиночного вертикального провода, расположенного непосредственно над земной поверхностью,

$$C'_v = \frac{24 H}{\lg(H/r\sqrt{3})},$$

где  $C'_v$  — емкость вертикального провода, пФ;  $H$  — высота провода, м;  $r$  — радиус провода, м.

В случае, когда вертикальная часть состоит из системы проводов, то в данной формуле радиус заменяется эквивалентным радиусом, определяемым по (14.4).

РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Марка кабеля	W, ом	Затухание, дБ/м, при частоте, ГГц			Мощность, кВт, при частоте, ГГц		
		0,1	1	3	0,1	1	3
PK 50—2—12	50	0,40	0,70	1,3	0,20	0,05	0,02
PK 50—3—13	50	0,15	0,65	1,3	0,27	0,07	0,04
PK 50—4—11	50	0,11	0,5	0,95	0,40	0,10	0,05
PK 50—7—11	50	0,09	0,4	0,8	0,60	0,14	0,07
PK 50—9—12	50	0,07	0,35	0,75	0,9	0,22	0,11
PK 50—11—11	50	0,06	0,29	0,55	1,3	0,32	0,19
PK 75—2—12	75	0,24	0,75	1,3	0,23	0,04	0,02
PK 75—3—13	75	0,11	0,5	0,9	0,29	0,07	0,04
PK 75—4—11	75	0,10	0,4	1,0	0,38	0,09	0,04
PK 75—4—13	75	0,13	0,55	1,0	0,3	0,08	0,04
PK 75—4—16	75	0,10	0,5	1,0	0,32	0,08	0,04
PK 75—4—21	75	0,10	0,4	0,8	1,3	0,35	0,2
PK 75—7—11	75	0,05	0,21	0,4	0,9	0,22	0,12
PK 75—7—12	75	0,09	0,4	0,9	0,6	0,14	0,07
PK 75—7—22	75	0,07	0,3	0,6	3,0	0,9	0,5
PK 75—7—39	75	0,05	0,18	0,3	0,8	0,25	0,16
PK 75—7—43	75	0,05	0,20	0,4	3,2	1,1	0,6
PK 75—9—12	75	0,06	0,26	0,6	0,9	0,26	0,13
PK 75—9—14	75	0,05	0,24	0,46	1,0	0,3	0,16
PK 75—9—23	75	0,05	0,21	0,4	4,0	1,1	0,6
PK 75—9—35	75	0,04	0,14	0,24	1,0	0,3	0,17
PK 75—9—41	75	0,03	0,18	0,42	5,1	1,1	0,5
PK 75—13—11	75	0,04	0,13	0,2	2,0	0,52	0,3
PK 75—13—32	75	0,02	0,11	0,35	1,5	0,4	0,24
PK 75—17—12	75	0,03	0,11	0,21	5,5	0,6	0,3
PK 75—17—22	75	0,03	0,1	0,23	9,0	2,0	1,0
PK 75—17—31	75	0,003	0,075	0,17	2,9	0,8	0,46
PK 75—24—41	75	0,025	0,088	0,16	5,6	2,4	1,4
PK 100—7—11	100	0,08	0,41	0,9	0,41	0,13	0,08

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

КОЭФФИЦИЕНТ УКОРОЧЕНИЯ ВОЛНЫ В КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

Тип изоляции кабеля	Коэффициент укорочения	Тип изоляции кабеля	Коэффициент укорочения
Полиэтиленовая	1,52	Магнезитовая	1,8
Политетрафторэтиленовая	1,42	Воздушно-полиэтиленовая	1,18 — 1,24
Резиновая	1,73	Воздушно-политетрафторэтиленовая	1,16 — 1,4

СИММЕТРИЧНЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Марка кабеля	W, Ом	Затухание, дБ/м, при частоте, МГц			Диаметр, мм		Размер оболочки, мм
		45	200	1000	жила	изоляция	
РД 100—0,6—21	100	—	0,36	—	0,08	0,6	1,8×1,25
РД 200—7—11	200	0,06	0,15	—	0,6	7,3	11,3×19,4
РД 300—4—11	300	0,1	—	—	0,28	4,6	12,6×7,4
РД 15	154	0,06	—	2,7	1,11	7,0	11,0×18,8
РД 17	100	0,05	—	—	2,37	6,3	16,6
РД 126	188	0,06	—	2,6	0,68	6,8	9,9×17,4
КАП	300	0,1	—	—	0,96	—	1,0×10,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чернышов В. П. Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания. М.: Связь, 1978 г.
- Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. М.: Сов. радио, 1978.
- Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972.
- Инженерно-технический справочник по электросвязи. Вып. 8. Радиосвязь. М.: Связьиздат, 1958.
- Инженерно-технический справочник по электросвязи. Радиорелейные линии. М.: Связь, 1971.
- Айзенберг Г. З. Коротковолновые антенны. М.: Связьиздат, 1962.
- Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. В двух частях. М.: Связь, 1977.
- Метрикин А. А. Антенны и волноводы РРЛ. М.: Связь, 1977.
- Белоруссов Н. И., Гроднев И. И. Радиочастотные кабели. М.: Энергия, 1973.
- Белоусов С. П. Средневолновые антенны с регулируемым распределением тока. М.: Связь, 1974.
- Указания по производству и приемке монтажных работ при строительстве передающих и приемных радиостанций. Вып. 7. М.: Связь, 1973.
- Белоусов С. П. Направленные антенны для профессионального приема радиовещания в диапазоне 200—2000 м. М.: Связь, 1961.
- Савицкий Г. А. Расчет антенных сооружений. М.: Связь, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Список основных обозначений	4
Глава 1. Общие вопросы распространения радиоволн	6
1.1. Основные соотношения	6
1.2. Распространение радиоволн в поглощающих средах	7
1.3. Пространство, эффективно участвующее в передаче энергии	7
1.4. Профиль трассы	9
1.5. Азимут и расстояние между пунктами радиосвязи по земной поверхности	9
Глава 2. Распространение сантиметровых, дециметровых и метровых волн	14
Глава 3. Распространение декаметровых волн	20
Глава 4. Распространение гектометровых волн	31
Глава 5. Распространение километровых и мирнаметровых волн	35
Глава 6. Параметры и характеристики антенн	36
Глава 7. Симметричный и несимметричный вибраторы	41
Глава 8. Многовибраторные антенны	46
Глава 9. Приемные антенны	56
Глава 10. Фидеры	59
10.1. Основные соотношения	59
10.2. Симметричные фидеры	60
10.3. Несимметричные фидеры	60
10.4. Прямоугольные волноводы	62
10.5. Круглые волноводы	62
10.6. Фидерные трансформаторы	63
Глава 11. Вибраторные антенны метровых и дециметровых волн	71
11.1. Панельные антенны	71
11.2. Спиральные антенны	73
11.3. Системы коллективного приема телевидения	75
Глава 12. Антенны радиорелейных линий связи	86
12.1. Излучение плоских раскрывов	86
12.2. Рупорные антенны и облучатели	88
12.3. Параболические антенны	90
12.4. Перископические антенны	91
12.5. Рупорно-параболические антенны	91
Глава 13. Антенны декаметровых волн	99
13.1. Введение	99
13.2. Слабонаправленные антенны с горизонтальной поляризацией	100
13.3. Сифазные антенны	100
13.4. Ромбические антенны	103
13.5. Приемные антенны бегущей волны	105
13.6. Антенна кругового действия	108
Глава 14. Антенны гектометровых и километровых волн	115
14.1. Введение	115
14.2. Антенны с нижним питанием	115
14.3. Антенны с регулируемым распределением тока (АРРТ)	117
14.4. Шунтовая антенна-мачта	118
14.5. Антенна с верхним питанием	118
14.6. Заземленная антенна	119
14.7. Рамочные антенны	120
14.8. Однопроводная антенна бегущей волны	120
14.9. Вертикальная несимметричная антенна бегущей волны	120
Глава 15. Эксплуатационные измерения антенно-фидерных устройств	125
15.1. Измерения параметров фидеров	125
15.2. Согласование фидера с антенной	127
15.3. Снятие диаграмм направленности	128
Глава 16. Дипломное проектирование	134
16.1. Задачи и темы дипломного проектирования	134
16.2. Состав дипломного проекта	136
16.3. Пример задания на дипломное проектирование	136
16.4. Примерное содержание дипломного проекта	137
Ответы к задачам	138
Приложения	140
Список литературы	144