



*Томский межвузовский центр
дистанционного образования*

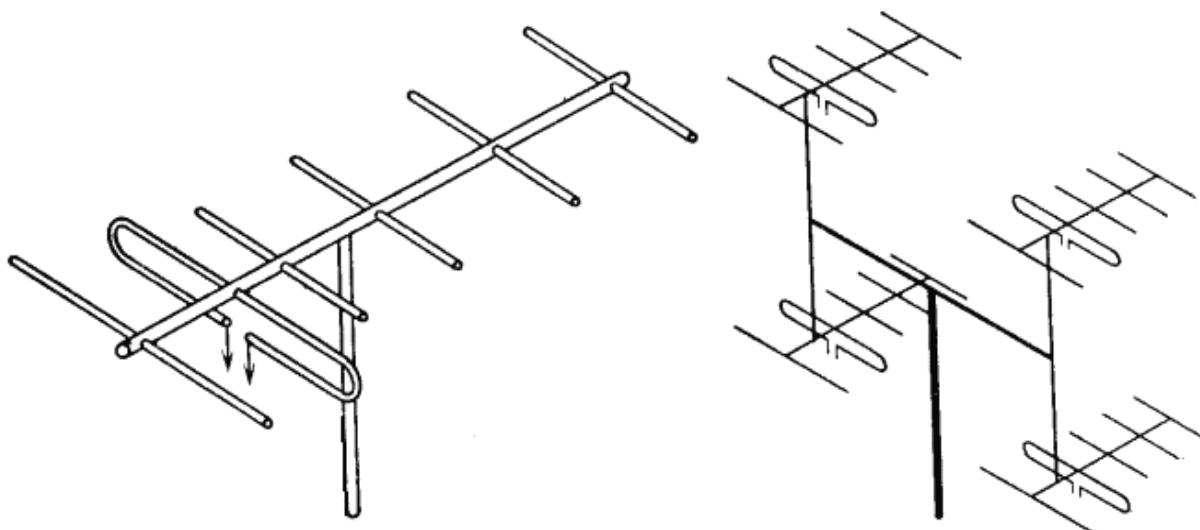
Г.Г. Гошин

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Часть 2

Антенны

Учебное методическое пособие



ТОМСК – 2003

Министерство образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ)

Г.Г. Гошин

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Часть 2

Антенны

Учебное методическое пособие

2003

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Томского государственного университета
Беличенко В.П.

Гошин Г.Г.

Устройства СВЧ и антенны: Учебное методическое пособие. В 2-х частях. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – Часть 2: Антенны. – 130 с.

В пособии приводится справочный материал и даны рекомендации по решению типовых задач по расчету основных характеристик и параметров линейных, апертурных антенн и антенных решеток. Приведены задачи для самостоятельного решения и 60 вариантов контрольных заданий.

Предназначено для студентов радиотехнических специальностей вузов, обучающихся с использованием дистанционных образовательных технологий, а также различных форм очного и заочного образования.

© Гошин Г.Г., 2003
© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
5 ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН	7
5.1. Основные теоретические сведения и расчетные соотношения...	7
5.2 Примеры решения типовых задач	13
5.3 Задачи для самостоятельного решения	16
6 ЛИНЕЙНЫЕ АНТЕННЫ	19
6.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения...	19
6.2 Примеры решения типовых задач	38
6.3 Задачи для самостоятельного решения	44
7 АПЕРТУРНЫЕ АНТЕННЫ	47
7.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения...	47
7.2 Примеры решения типовых задач	61
7.3 Задачи для самостоятельного решения	68
8 АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ	71
8.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения...	71
8.2 Примеры решения типовых задач	82
8.3 Задачи для самостоятельного решения	88
9 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 3.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие отражает разделы дисциплины «Устройства СВЧ и антенны» по антенной тематике для радиотехнических специальностей вузов. Цель пособия – помочь студентам закрепить усвоение разделов теоретического курса и научиться проводить расчеты параметров и характеристик основных типов антенн. Современный радиоспециалист должен ориентироваться в этих вопросах, должен знать возможности различных типов антенн, их достоинства и недостатки, а в конкретной ситуации суметь правильно выбрать, рассчитать и спроектировать требуемое антенное устройство.

Материал в пособии разбит на четыре тематических раздела. По своей структуре все разделы идентичны, и каждый состоит из трех частей. В первой части приводится справочный материал в виде основных теоретических сведений и формул, необходимый для проведения расчетов основных параметров и характеристик антенн и фидеров. Во второй части даются методические указания и приводится решение типовых задач. В третьей части предлагаются задачи для самостоятельного решения с ответами. Ответы часто носят приближенный характер, что связано с возможностью округления чисел при вычислениях, а иногда с возможностью расчета одной и той же величины по различным приближенным формулам. В конце пособия приведены задачи для проведения контрольной работы по расчету параметров и характеристик основных типов антенн (60 вариантов по 5 задач в каждом).

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ДН – диаграмма направленности;
 КБВ – коэффициент бегущей волны;
 КИП – коэффициент использования поверхности антенны;
 КНД – коэффициент направленного действия антенны;
 КПД – коэффициент полезного действия;
 КСВ – коэффициент стоячей волны;
 КУ – коэффициент усиления антенны;
 ЛНС – линейная непрерывная система;
 ЛП – линия передачи;
 ПЗА – параболическая зеркальная антенна;
 УБЛ – уровень боковых лепестков;
 ФАР – фазированная антенная решетка;
 ЦСА – цилиндрическая спиральная антенна;
 ЭДС – электродвижущая сила;
a – размер широкой стенки прямоугольного волновода; радиус круглого волновода; радиус проводника; большая полуось эллипса поляризации;
b – размер узкой стенки прямоугольного волновода; малая полуось эллипса поляризации; ширина щели;
a_p – размер прямоугольной апертуры; радиус круглой апертуры;
b_p – размер прямоугольной апертуры;
c = $3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света;
d – диаметр проводников двухпроводного фидера; диаметр внутреннего проводника коаксиального фидера;
d_p – диаметр раскрыва круглой апертуры, зеркальной или линзовой антенн;
D – расстояние между центрами проводников двухпроводного фидера; диаметр (внутренний) наружного проводника коаксиального фидера;
*D*₀ – коэффициент направленного действия антенны в направлении максимума ДН;
f – частота, Гц;
f_a – фокусное расстояние зеркальной или линзовой антенны;
F(θ, φ) – диаграмма направленности антенны;
*G*₀ – коэффициент усиления антенны в направлении максимума ДН;
h – высота подвеса антенны над плоским экраном; толщина линзы; осевое смещение вибраторов в решетке;
i – мнимая единица;
I – ток, А;
k = $2\pi/\lambda$ – волновое число в среде распространения, м⁻¹;
K_П – коэффициент перекрытия диапазона по частоте;
l – длина плеча симметричного вибратора;
l_{эф} – эффективная (действующая) длина антенны;

- L_{opt} – длина оптимальной линейной антенны;
 m – целое число; отношение компонент напряженности поля или токов;
 n – целое число; коэффициент преломления линзы;
 P – мощность, Вт;
 $S_{эф}$ – эффективная поверхность антенны, м²;
 T – шумовая температура антенны, К;
 U – напряжение, В;
 W_e или w_e – волновое сопротивление ЛП, Ом;
 $w = \sqrt{\mu/\epsilon}$ – характеристическое (волновое) сопротивление среды, Ом;
 $w_0 = 120\pi$ – характеристическое (волновое) сопротивление воздуха, Ом;
 X – реактивное сопротивление, Ом;
 Y – комплексная проводимость, См;
 Z – комплексное сопротивление (импеданс), Ом;
 $\beta = 2\pi/\lambda_g$ – фазовая постоянная (постоянная распространения) в линии;
 γ – коэффициент согласования (передачи) антенны по мощности;
 γ_θ – угол наклона большой оси эллипса поляризации;
 Γ – коэффициент отражения;
 $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2}$, Ф/м – абсолютная электрическая проницаемость свободного
 (воздушного) пространства;
 ϵ – относительная электрическая проницаемость среды;
 η – коэффициент полезного действия;
 θ – меридиональный угол в сферической системе координат;
 $2\theta_{0,5}$ – ширина ДН антенны на уровне 0,5 по мощности;
 $2\theta_0$ – ширина ДН антенны по нулям;
 λ – рабочая длина волны (длина волны генератора);
 длина плоских волн в воздушном пространстве;
 λ_g – длина волны в линии;
 $\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}$, Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость свободного
 (воздушного) пространства;
 μ – относительная магнитная проницаемость среды;
 ν – коэффициент использования поверхности антенны;
 ξ – коэффициент замедления (укорочения) волны;
 φ – азимутальный угол в сферической системе координат;
 χ – угол между плоскостями поляризации передающей и приемной антенн;
 $2\theta_p$ или $2\psi_p$ – полный угол раскрытия зеркальной и линзовой антенн;
 ω – круговая частота.

5 ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН

5.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения

Передающая антенна

Комплексная векторная характеристика направленности передающей антенны по электрическому полю в дальней зоне, т.е. на расстоянии r от нее, удовлетворяющем неравенству

$$r/\lambda \geq 2(a+b)^2/\lambda^2, \quad (5.1)$$

где a и b – максимальные размеры передающей и приемной антенн, соответственно, λ – длина волны, в сферической системе координат описывается выражением

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \vec{p}(\theta, \varphi) \exp[i\Phi(\theta, \varphi)]. \quad (5.2)$$

В этом выражении $F(\theta, \varphi)$, $\vec{p}(\theta, \varphi)$, $\Phi(\theta, \varphi)$ – соответственно амплитудная, поляризационная и фазовая характеристики (диаграммы) антенны. Неравенство (5.1) получено при максимально допустимых (в поперечном направлении) фазовых искажениях поля, равных $\pi/8$.

Нормированные амплитудные ДН по напряженности поля и по мощности для антенны линейной поляризации определяются соотношениями

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi)/E_{\max}(\theta_1, \varphi_1), \quad (5.3)$$

$$\bar{F}^2(\theta, \varphi) = E^2(\theta, \varphi)/E_{\max}^2(\theta_1, \varphi_1), \quad (5.4)$$

где $E_{\max}(\theta_1, \varphi_1)$ – значение амплитуды электрического поля в максимуме ДН; θ_1, φ_1 – углы, соответствующие максимумам излучения; черта над символом функции означает нормировку.

Иногда нормированные ДН выражают в логарифмическом масштабе (в децибелах):

$$\bar{F}^2(\theta, \varphi) = 20 \lg \bar{F}(\theta, \varphi) = 10 \lg \bar{F}^2(\theta, \varphi). \quad (5.5)$$

Пространственное изображение нормированных амплитудных ДН имеет вид замкнутых поверхностей. По каждой из угловых координат обычно рассматривают два ортогональных сечения диаграммы в так называемых главных плоскостях, проходящих через ее максимальное значение. Например, если рассматривают ДН как функцию от θ , то в плоскостях $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/2$. Сечение ДН главной плоскостью, содержащей электрический вектор, называют ДН в плоскости E , а сечение главной плоскостью, содержащей магнитный вектор, – ДН в плоскости H . Плоские сечения нормированных амплитудных ДН изображают как в полярных, так и в прямоугольных координатах, причем первый способ используют преимущественно для построения ДН слабонаправленных антенн, а второй – остронаправленных.

Из графического построения нормированных ДН определяют полную ширину $2\theta_{0,5}$ главного лепестка (луча) на уровне 0,5 по мощности (0,707 по полю или -3 дБ в логарифмическом масштабе), положения нулей, а также уровень боковых лепестков $\bar{F}_{q\max}$ и их направления $\theta_{q\max}$, где q – номер бокового лепестка.

Поляризация передающей антенны определяется поляризацией ее поля излучения по электрическому вектору. Наиболее общим случаем поляризации является эллиптическая поляризация, которая полностью описывается следующими параметрами поляризационного эллипса:

- углом γ_{ϑ} наклона большой оси эллипса к орту $\vec{\theta}_0$ сферической системы координат ($0 \leq \gamma_{\vartheta} \leq \pi / 2$);

- коэффициентом эллиптичности поляризации

$$K_{\vartheta} = b/a, \quad (5.6)$$

где b и a – малая и большая полуоси эллипса ($0 \leq K_{\vartheta} \leq 1$);

- знаком поляризации $signK_{\vartheta}$, который указывает на направление вращения электрического вектора в плоскости эллипса: $signK_{\vartheta} > 0$ для правой поляризации и $signK_{\vartheta} < 0$ – для левой.

При $K_{\vartheta} = 0$ эллипс вырождается в прямую линию и поле имеет линейную поляризацию; при $K_{\vartheta} = \pm 1$ эллипс становится окружностью и поле имеет круговую поляризацию.

Параметры поляризационного эллипса при известных компонентах излучаемого поля определяются по формулам

$$\gamma_{\vartheta} = 0,5 \arctg \frac{2m \cos \psi}{1 - m^2}; \quad (5.7)$$

$$K_{\vartheta} = 2m \sin \psi / [1 + m^2 + \sqrt{(1 + m^2)^2 - (2m \sin \psi)^2}], \quad (5.8)$$

где $m = E_{\varphi} / E_{\theta}$ – отношение амплитуд ортогональных компонент,

$\psi = (\arg \dot{E}_{\varphi} - \arg \dot{E}_{\theta})$ – разность фаз комплексных амплитуд этих компонент.

Обратные зависимости имеют вид

$$m = \sqrt{(K_{\vartheta}^2 \operatorname{tg}^2 \gamma_{\vartheta} + 1) / (K_{\vartheta}^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma_{\vartheta})}; \quad (5.9)$$

$$\psi = \arctg \{ 2K_{\vartheta}^2 / [(1 - K_{\vartheta}^2) \sin 2\gamma_{\vartheta}] \}. \quad (5.10)$$

Зависимость коэффициента эллиптичности от угловых координат точки наблюдения называют поляризационной диаграммой антенны.

Знание амплитудной и поляризационной диаграмм передающей антенны позволяет определить ее КНД. Для антенны линейной поляризации КНД по отношению к изотропному излучателю в направлении максимума ДН определяется выражением

$$D_0 = 4\pi \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \bar{F}^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (5.11)$$

Для антенны эллиптической поляризации при совпадении максимумов парциальных ДН выражение для КНД имеет более сложный вид

$$D_0 = D_{\theta 0} + D_{\varphi 0}, \quad (5.12)$$

где

$$D_{\theta 0} = 4\pi \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} [\bar{F}_{\theta}^2(\theta, \varphi) + \bar{F}_{\varphi}^2(\theta, \varphi)/m^2] \sin \theta d\theta d\varphi \quad - \quad \text{парциальный}$$

КНД для компоненты поля E_{θ} ,

$$D_{\varphi 0} = 4\pi \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} [m^2 \bar{F}_{\theta}^2(\theta, \varphi) + \bar{F}_{\varphi}^2(\theta, \varphi)] \sin \theta d\theta d\varphi \quad - \quad \text{парциальный}$$

КНД для компоненты поля E_{φ} .

Здесь $\bar{F}_{\theta}(\theta, \varphi)$ и $\bar{F}_{\varphi}(\theta, \varphi)$ – нормированные амплитудные ДН взаимно ортогональных компонент.

На практике применяют приближенную оценку КНД по формуле

$$D_0 \approx \frac{10}{2\theta_{0,5}^E 2\theta_{0,5}^H}, \quad (5.13)$$

где $2\theta_{0,5}^E$ и $2\theta_{0,5}^H$ – ширина ДН антенны на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях в радианах.

При расчете КНД проволочной антенны можно использовать соотношение

$$D_0 = \frac{\pi w}{R_{\Sigma ex}} (l_{\text{эф}} / \lambda)^2, \quad (5.14)$$

где $l_{\text{эф}}$ и $R_{\Sigma ex}$ – эффективная (действующая) длина и сопротивление излучения, отнесенное к входу антенны; λ – длина волны; w – волновое сопротивление среды (для вакуума $w_0 = 120\pi \text{ Ом}$).

КПД антенны находится как

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_{\Pi}} = \frac{R_{\Sigma ex}}{R_{ex}}, \quad (5.15)$$

где P_{Σ} – мощность излучения антенны, P_{Π} – мощность потерь в антенне;

$R_{ex} = R_{\Sigma ex} + R_{\Pi}$ – активная часть входного сопротивления антенны,

$R_{\Sigma ex}$ – сопротивление излучения антенны относительно ее входа,

R_{Π} – сопротивление потерь в антенне.

Коэффициент усиления антенны в направлении максимума ДН определяется по формуле

$$G_0 = \eta D_0. \quad (5.16)$$

Диапазонные свойства антенны характеризуют либо отношением ширины полосы рабочих частот Δf к средней частоте диапазона f_{cp} и определяют в процентах

$$\frac{\Delta f}{f_{cp}} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} 100\%, \quad (5.17)$$

где f_{\max} и f_{\min} – максимальная и минимальная частоты рабочего диапазона антенны,

либо коэффициентом перекрытия диапазона

$$K_{\Pi} = f_{\max} / f_{\min}. \quad (5.18)$$

Приемная антенна

По теореме взаимности приемную антенну характеризуют те же параметры, что и передающую. ЭДС, наводимая (возбуждаемая) в приемной антенне полем электромагнитной волны, может быть найдена по формуле Неймана

$$\mathcal{E} = E l_{\text{эф}} \cdot \bar{F}(\theta, \varphi) \cos \chi, \quad (5.19)$$

в которой

$$l_{\text{эф}} = \lambda \sqrt{\frac{G_0 R_{\text{ex}}}{\pi W}} = \lambda \sqrt{\frac{D_0 R_{\Sigma \text{ex}}}{\pi W}}. \quad (5.20)$$

В этих формулах: E – напряженность поля действующей на антенну волны; $l_{\text{эф}}$ – эффективная длина антенны; $\bar{F}(\theta, \varphi)$ – нормированная амплитудная ДН антенны; χ – угол между плоскостями поляризации приемной антенны и входящей волны; λ – длина волны; G_0 – коэффициент усиления антенны в направлении максимума ДН; R_{ex} – активная составляющая входного сопротивления антенны; D_0 – КНД антенны в направлении максимума ДН; $R_{\Sigma \text{ex}}$ – сопротивление излучения антенны относительно ее входа.

Максимальная ЭДС в приемной антенне будет, когда $\bar{F}(\theta, \varphi) \cos \chi = 1$.

Максимально возможная мощность (в ваттах), отдаваемая приемной антенной с входным сопротивлением $Z_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} + iX_{\text{ex}}$ в согласованную нагрузку (приемник) $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + iX_{\text{н}}$, непосредственно подключенную к антенне, имеет место при $R_{\text{ex}} = R_{\text{н}}$, $X_{\text{ex}} = -X_{\text{н}}$ и определяется по формуле

$$P_{\max} = \mathcal{E}_{\max}^2 / 8R_{\text{ex}}. \quad (5.21)$$

Мощность, отдаваемая приемной антенной в несогласованную нагрузку ($R_{\text{ex}} \neq R_{\text{н}}$, $X_{\text{ex}} \neq -X_{\text{н}}$), рассчитывается по формуле

$$P = \gamma P_{\max} = \frac{4R_{\text{ex}}R_{\text{н}}}{(R_{\text{ex}} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\text{ex}} + X_{\text{н}})^2} P_{\max}, \quad (5.22)$$

где γ – коэффициент согласования антенны с нагрузкой (коэффициент передачи по мощности).

Мощность, которую приемная антенна отдает в нагрузку в случае, когда входное сопротивление антенны чисто активное и равно волновому сопротивлению фидера $Z_{ex} = R_{ex} = W_\phi$, а нагрузка не согласована с фидером $Z_n \neq W_\phi$, находится как

$$P = (1 - |\Gamma|^2) P_{\max}, \quad (5.23)$$

где Γ – коэффициент отражения от нагрузки.

Формулы (5.21) – (5.23) потери не учитывают. Чтобы их учесть, необходимо правые части формул умножить на КПД.

Эффективная площадь (в квадратных метрах) приемной антенны с учетом потерь определяется выражением

$$S_{эф} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0. \quad (5.24)$$

Для линейных антенн эффективная площадь вводится чисто формально и пропорциональна квадрату эффективной длины

$$S_{эф} = \frac{w}{4R_\Sigma} l_{эф}^2, \quad (5.25)$$

где w – волновое сопротивление среды, R_Σ – сопротивление излучения антенны.

Собственная шумовая температура приемной антенны (в градусах Кельвина) определяется по формуле

$$T_{AT} = T_0(1 - \eta), \quad (5.26)$$

где T_0 – температура окружающей среды, К.

Максимальная мощность полезного сигнала P_{np} на выходе приемной антенны, находящейся в дальней зоне относительно передающей антенны, рассчитывается по формуле идеальной радиопередачи

$$P_{np} = \frac{P_{nep} G_{nep} G_{np} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (5.27)$$

где P_{nep} – мощность излучения передающей антенны; G_{nep} , G_{np} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; λ – длина волны; r – расстояние между антеннами.

Электрически малые излучатели

К электрически малым излучателям относятся: элементарный электрический вибратор (диполь Герца), элементарная рамка, элементарная щель

(магнитный диполь Герца) и элементарная площадка (элемент Гюйгенса).

• Комплексные амплитуды электрического (в вольтах на метр) и магнитного (в амперах на метр) полей в дальней зоне элементарного электрического вибратора, находящегося в однородной изотропной среде с волновым сопротивлением w , определяются по формулам

$$\dot{E}_\theta = i \frac{w I_0 k l}{4\pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (5.28)$$

$$\dot{H}_\varphi = \dot{E}_\theta / w, \quad (5.29)$$

где w – волновое сопротивление среды; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны; $I_0 = const$ – амплитуда тока в вибраторе; l – длина вибратора; r – расстояние от вибратора до точки наблюдения; $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$ – нормированная амплитудная ДН вибратора в плоскости, проходящей через ось вибратора (плоскость E); θ – угол между осью вибратора и направлением в точку наблюдения.

Сопротивление излучения элементарного электрического вибратора находится как

$$R_\Sigma = \frac{2}{3} \pi w \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2, \text{ Ом.} \quad (5.30)$$

• Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей в дальней зоне элементарной электрической рамки, находящейся в однородной изотропной среде с волновым сопротивлением w , определяются по формулам

$$\dot{E}_\varphi = \frac{w I_0 k^2 S_p}{4\pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (5.31)$$

$$\dot{H}_\theta = -\dot{E}_\varphi / w, \quad (5.32)$$

где $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$; S_p – площадь рамки.

• Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей в дальней зоне элементарной односторонней щели в экране, находящейся в однородной изотропной среде с волновым сопротивлением w , равны

$$\dot{E}_\varphi = -i \frac{E_{щ} k l b}{2\pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (5.33)$$

$$\dot{H}_\theta = -\dot{E}_\varphi / w, \quad (5.34)$$

где $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$; $E_{щ} = U_{щ} / b$ – напряженность электрического поля в щели, $U_{щ} = const$ – напряжение в точках питания щели; l, b – длина и ширина щели соответственно.

Проводимость излучения элементарной односторонней щели находится как

$$G_{\Sigma} = \frac{8\pi}{3w} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2, \text{ См.} \quad (5.35)$$

• Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей в дальней зоне элемента Гюйгенса в однородной изотропной среде с волновым сопротивлением w определяются по формулам

$$\dot{E}_{\theta} = -i \frac{E_0 k S}{2\pi r} \bar{F}(\theta) \sin \varphi \exp(-ikr); \quad (5.36)$$

$$\dot{E}_{\varphi} = -i \frac{E_0 k S}{2\pi r} \bar{F}(\theta) \cos \varphi \exp(-ikr); \quad (5.37)$$

$$\dot{H}_{\theta} = -\dot{E}_{\varphi} / w; \quad (5.38)$$

$$\dot{H}_{\varphi} = -\dot{E}_{\theta} / w, \quad (5.39)$$

где $E_0 = \text{const}$ – амплитуда напряженности электрического поля на поверхности элемента; S – площадь элемента; $\bar{F}(\theta) = 0,5(1 + \cos \theta)$ – нормированная амплитудная ДН в плоскостях E ($\varphi = 0$) и H ($\varphi = \pi/2$).

Теорема о перемножении диаграмм направленности

В силу линейности уравнений Максвелла электромагнитное поле системы (решетки) излучателей представляет собой сумму полей ее отдельных элементов. Если эти элементы имеют одинаковые размеры, одинаковые амплитудно-фазовые распределения возбуждающего поля или тока и ориентированы в пространстве одинаковым образом, то суммарная ДН может быть записана в виде произведения векторной комплексной ДН одного элемента $\vec{F}_{эл}(\theta, \varphi)$ на скалярный множитель направленности $f_{\Sigma}(\theta, \varphi)$, представляющий собой диаграммы направленности системы точечных изотропных излучателей, расположенных в фазовых центрах элементов системы (узлах решетки), т.е.

$$\vec{F}_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \vec{F}_{эл}(\theta, \varphi) \cdot f_{\Sigma}(\theta, \varphi). \quad (5.40)$$

Теорему применяют для нахождения ДН любых типов антенных систем, которые можно представить в виде совокупности однотипных непрерывно или дискретно распределенных излучателей.

5.2 Примеры решения типовых задач

1. Сопротивление излучения проволочной передающей антенны $R_{\Sigma ex} = 10 \text{ Ом}$, сопротивление потерь в антенне $R_{II ex} = 5 \text{ Ом}$. Определить КНД и КУ антенны в направлении максимума ДН, если эффективная длина антенны $l_{эф} = 3 \text{ м}$, а длина волны $\lambda = 12 \text{ м}$.

Решение. КНД находим по формуле (5.14):

$$D_0 = \frac{\pi w}{R_{\Sigma_{ex}}} \left(\frac{l_{\text{эф}}}{\lambda} \right)^2 = \frac{120\pi^2}{10} \left(\frac{3}{12} \right)^2 = \frac{3}{4}\pi^2 \cong 7,4.$$

КУ и КПД определяем по формулам (5.16) и (5.15):

$$G_0 = \eta D_0 = D_0 R_{\Sigma} / (R_{\Sigma} + R_{II}) = \frac{0,75\pi^2 \cdot 10}{15} = \frac{\pi^2}{2} \cong 4,93.$$

2. Проволочная передающая антенна характеризуется параметрами: полоса частот $\Delta f = 300 \text{ кГц}$; коэффициент перекрытия диапазона $K_{II} = 1,2$. Чему равен КУ антенны на средней частоте диапазона в направлении максимума ДН, если сопротивление излучения антенны $R_{\Sigma} = 15 \text{ Ом}$, сопротивление потерь $R_{II} = 3 \text{ Ом}$, а действующая длина антенны $l_{\text{эф}} = 100 \text{ м}$?

Решение. Согласно формуле (5.18), $K_{II} = f_{\text{max}} / f_{\text{min}} = 1,2$. Откуда $f_{\text{max}} = 1,2 f_{\text{min}}$. Подставив это соотношение в формулу (5.17), получим $\frac{\Delta f}{f_{cp}} = 2 \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} + f_{\text{min}}} = 2 \frac{1,2 - 1}{1,2 + 1} \cong 0,182$, т.е. $f_{cp} = \frac{\Delta f}{0,182} = \frac{300 \text{ кГц}}{0,182} \cong 1,65 \text{ МГц}$.

При этом средняя длина волны составит $\lambda_{cp} \cong 182 \text{ м}$.

КУ находим по формуле (5.16) через КНД и КПД. Для КНД из формулы (5.14) имеем $D_0 = \frac{\pi w}{R_{\Sigma_{ex}}} \left(\frac{l_{\text{эф}}}{\lambda} \right)^2 \cong \frac{120\pi^2}{15} \left(\frac{100}{182} \right)^2 \cong 23,834$.

КПД по формуле (5.15) равен $\eta = \frac{15}{15 + 3} \cong 0,833$. Подставив найденные значения КНД и КПД в (5.16), окончательно получим $G_0 \cong 23,834 \cdot 0,833 \cong 19,86$.

3. Определить максимальную ЭДС, наводимую в приемной антенне электромагнитной волной длиной $\lambda = 13 \text{ м}$ с напряженностью электрического поля $E = 200 \text{ мкВ/м}$ в месте приема, при условии, что антенна имеет КУ в направлении максимума ДН $G_0 = 100$ и входное сопротивление $R_{ex} = 500 \text{ Ом}$.

Решение. Максимальную ЭДС определяем по формуле (5.20):

$$\mathcal{E}_{\text{max}} = E \lambda \sqrt{\frac{G_0 R_{ex}}{\pi w}} = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 13 \sqrt{\frac{100 \cdot 500}{120\pi^2}} \cong 16,9 \text{ (мВ)}.$$

4. Собственная шумовая температура приемной антенны при температуре окружающей среды $T_0 = 280 \text{ К}$ составляет $T_{AT} = 28 \text{ К}$. На какой частоте работает антенна, если ее эффективная поверхность $S_{\text{эф}} = 18 \text{ м}^2$, а КНД в направлении максимума ДН $D_0 = 10\,000$?

Решение. Рабочую длину волны можно найти по формуле (5.24), из которой следует $\lambda = \sqrt{4\pi S_{\text{эф}} / G_0}$. КУ найдем по формуле (5.16), зная КНД и КПД. Последний определим из формулы (5.26):

$\eta = (1 - T_{AT}/T_0) = (1 - 0,1) = 0,9$. Тогда $G_0 = 0,9 \cdot 10\,000 = 9\,000$. Подставив в формулу для λ , получим $\lambda = \sqrt{4\pi \cdot 18/9\,000} \cong 0,1585$ (м). Частоту найдем как $f = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 / 0,1585 \cong 1,89$ (ГГц).

5. Круглая рамочная антенна установлена под углом $\theta = \pi/6$ радиан к направлению на передатчик, работающий на волне $\lambda = 50$ м и создающий в месте приема напряженность электрического поля $E = 250$ мВ/м. Параметры антенны: $G_0 = 1,5$; $R_{ex} = 6$ Ом; $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$. Угол между плоскостями поляризации рамки и приходящей волны $\chi = 0,2$ радиан. Определить ЭДС, наводимую в приемной антенне, и величину мощности, отдаваемую антенной в нагрузку с сопротивлением $Z_n = (24 + i 20)$ Ом.

Решение. ЭДС, возбуждаемую в антенне, определяем по формулам (5.19), (5.20):

$$\mathcal{E} = E\lambda \sqrt{\frac{G_0 R_{ex}}{\pi w}} \bar{F}(\theta, \varphi) \cos \chi = \frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{\pi} \sqrt{\frac{1,5 \cdot 6}{120}} \sin(\pi/6) \cos 0,2 = 0,535 \text{ (В)}.$$

Максимальная мощность, отдаваемая антенной в согласованную нагрузку, находится по формуле (5.21):

$$P_{max} = \frac{G_0}{960} \left(\frac{E\lambda}{\pi} \right)^2 = \frac{1,5}{960} \left(\frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{\pi} \right)^2 \approx 24,8 \text{ (мВт)}.$$

Мощность, отдаваемую антенной в заданную нагрузку, находим по формуле (5.22):

$$P = \frac{4R_{ex}R_n}{(R_{ex} + R_n)^2 + (X_{ex} + X_n)^2} P_{max} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 24}{(6 + 24)^2 + 20^2} \cdot 24,8 = 11 \text{ (мВт)}.$$

6. Элементарные электрические излучатели – вибратор и круглая рамка – на частоте $f = 150$ МГц возбуждаются током, амплитуда которого $I_0 = 2$ А. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых этими излучателями в точке наблюдения, находящейся на расстоянии $r = 5$ км от излучателей под углом $\theta = \pi/6$ радиан к их оси, если длина вибратора $l = 10$ см, а диаметр рамки $d_p = 18$ см.

Решение. Частоте $f = 150$ МГц соответствует длина волны

$$\lambda = c/f = \frac{3 \cdot 10^8}{150 \cdot 10^6} \text{ м} = 2 \text{ м}. \text{ Пользуясь формулами (5.28) и (5.31), находим:}$$

для вибратора

$$E_\theta = |\dot{E}_\theta| = \frac{30I_0kl}{r} \sin \theta = \frac{30 \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 5 \cdot 10^3} \sin(\pi/6) \text{ В/м} \approx 1,88 \text{ мВ/м};$$

$$H_\varphi = |\dot{H}_\varphi| = |\dot{E}_\theta| / 120\pi = \frac{1,88 \cdot 10^{-3}}{120\pi} \text{ А/м} \approx 5 \text{ мкА/м};$$

для рамки (площадь рамки $S_p = \pi d_p^2 / 4$)

$$E_{\varphi} = |\dot{E}_{\varphi}| = \frac{30\pi^3 d_p^2 I_0}{\lambda^2 r} \sin\theta = \frac{30\pi^3 (18 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 2}{2^2 \cdot 5 \cdot 10^3} \sin(\pi/6) \text{ В/м} \approx 1,5 \text{ мВ/м};$$

$$H_{\theta} = |\dot{H}_{\theta}| = |\dot{E}_{\varphi}| / 120\pi = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{120\pi} \text{ А/м} \approx 4 \text{ мкА/м}.$$

5.3 Задачи для самостоятельного решения

5.1. Элементарный электрический вибратор длиной $0,02 \text{ м}$ на частоте 300 МГц возбуждается током, амплитуда которого равна 1 А . Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей вибратора в точке, расположенной в экваториальной плоскости вибратора на расстоянии 1000 м от него.

Ответ: $E = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}; \quad H = 1 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}.$

5.2. Элементарный электрический вибратор длиной $0,02 \text{ м}$ на частоте 300 МГц возбуждается током, амплитуда которого равна 1 А . Определить мощность излучения и сопротивление излучения вибратора.

Ответ: $P_{\Sigma} = 0,158 \text{ Вт}; \quad R_{\Sigma} = 0,316 \text{ Ом}.$

5.3. Сопротивление излучения элементарного электрического вибратора $R_{\Sigma} = 0,2 \text{ Ом}$. Амплитуда напряженности магнитного поля на расстоянии $r = 500 \text{ м}$ от вибратора в направлении его максимального излучения $H_{\varphi} = 10 \text{ мкА/м}$. Определить амплитуду тока в вибраторе.

Ответ: $I_0 = 0,628 \text{ А}.$

5.4. Определить условие эквивалентности по излучаемой мощности элементарной электрической рамки, площадь которой равна $S_p \text{ (см}^2\text{)}$, элементарному электрическому вибратору длиной $l \text{ (см)}$ при равенстве амплитуд и частот возбуждающих их токов.

Ответ: $\frac{2\pi S_p}{\lambda} = l.$

5.5. Электрически малая круглая рамка диаметром $d_p = 6 \text{ см}$ на частоте $f = 300 \text{ МГц}$ возбуждается током, амплитуда которого $I_0 = 1 \text{ А}$. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в точке наблюдения, находящейся на расстоянии $r = 30 \text{ м}$ от рамки под углом $\theta = 2\pi/5 \text{ рад}$ к ее оси.

Ответ: $E_{\varphi} = 106 \text{ мВ/м}; \quad H_{\theta} = 281 \text{ мкА/м}.$

5.6. Амплитуда напряженности магнитного поля на расстоянии $r = 5 \text{ км}$ от элементарной излучающей щели в направлении ее максимального излучения $H_{\theta} = 25 \text{ мкА/м}$. Щель имеет размеры $l = 2 \text{ см}$, $b = 1 \text{ мм}$ и возбуждается на частоте $f = 300 \text{ МГц}$. Определить амплитуду напряженности электрического поля в щели.

Ответ: $E_{щ} = 2,36 \text{ мВ/м}.$

5.7. Определить параметры поляризационного эллипса передающей антенны, если отношение амплитуд азимутальной и меридиональной составляющих напряженности электрического поля равно 1, а сдвиг по фазе между ними равен 45° .

Ответ: $\gamma_{\vartheta} = 0,42 \text{ рад}; K_{\vartheta} = 0,61$.

5.8. Определить КНД передающей антенны линейной поляризации, нормированная амплитудная ДН которой описывается выражением $\bar{F}(\theta) = \sin^2 \theta$. Во сколько раз КНД этой антенны больше КНД антенны, нормированная амплитудная ДН которой описывается выражением $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$?

Ответ: $D_0 = 1,5$. В 1,25 раза.

5.9. Два симметричных вибратора находятся на некотором расстоянии друг от друга и взаимно ориентированы так, что их экваториальные плоскости совпадают. Длина первого вибратора, работающего в режиме передачи, в два раза больше длины второго вибратора и равна 6,25 м. Второй вибратор работает в режиме приема электромагнитной волны длиной 5 м, излучаемой первым вибратором. Определить минимальное расстояние (м) между вибраторами, начиная с которого приемный вибратор будет находиться в дальней зоне передающего вибратора. Максимальные фазовые искажения не должны превышать $\pi/8$.

Ответ: $r \approx 20 \text{ м}$.

5.10. Эффективная длина приемной антенны $l_{\text{эф}} = 10 \text{ м}$. Определить ЭДС, наводимую в антенне приходящим сигналом с напряженностью электрического поля $E = 15 \text{ мкВ/м}$, если прием осуществляется с направления максимума ДН, а угол между плоскостями поляризации антенн составляет $\chi = 60^\circ$.

Ответ: $\mathcal{E} = 75 \text{ мкВ}$.

5.11. Определить ЭДС, возбуждаемую в круглой рамочной антенне, согласованной по поляризации с приходящей волной и расположенной под углом $\theta = \pi/9 \text{ рад}$ к направлению на передатчик. Передатчик работает на волне длиной $\lambda = 100 \text{ м}$ и создает напряженность электрического поля в точке приема $E = 480 \text{ мкВ/м}$. Параметры антенны: $D_0 = 1,5$; $R_{\text{ex}} = 5 \text{ Ом}$; $\bar{F}(\theta, \varphi) = \sin \theta$.

Ответ: $\mathcal{E} \approx 1,3 \text{ мВ}$.

5.12. Определить мощность, отдаваемую приемной антенной в нагрузку, несогласованную с фидером, при условии, что входное сопротивление антенны равно волновому сопротивлению фидера, а коэффициент бегущей волны в фидере $K_{\text{БВ}} = 0,8$. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$ и имеет КУ $G_0 = 500$. Напряженность электрического поля в точке приема $E = 1 \text{ мВ/м}$. КПД антенно-фидерного устройства $\eta_{\text{АФУ}} = 1$.

Ответ: $P = 0,423 \text{ мВт}$.

5.13. Антенна, принимающая сигнал на частоте $f = 3\,000\text{ МГц}$, имеет параметры: $S_{эф} = 1,4\text{ м}^2$; $D_0 = 2\,000$. Определить собственную шумовую температуру антенны, если температура окружающей среды $T_0 = 300^\circ\text{ К}$.

Ответ: $T_{AT} = 36^\circ\text{ К}$.

5.14. Мощность сигнала, излучаемого передающей антенной с КУ $G_{пер} = 10$ на частоте $f = 30\text{ МГц}$, составляет $P_{пер} = 15\text{ Вт}$. Какой КУ должна иметь приемная антенна, установленная на расстоянии $r = 1\text{ км}$ от передающей, чтобы максимальная мощность принимаемого сигнала была равна $P_{пр} = 1\text{ мВт}$?

Ответ: $G_{пр} = 12,5$.

6 ЛИНЕЙНЫЕ АНТЕННЫ

6.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения

Симметричный электрический вибратор

Напряженность электрического поля (в вольтах на метр) в дальней зоне тонкого симметричного вибратора в предположении синусоидального закона распределения тока вдоль вибратора находится по формуле

$$E_{\theta} = \frac{i\omega I_{\max}}{2\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}, \quad (6.1)$$

где $I_{\max} = I_{\text{ex}} / \text{sinkl}$ – амплитуда тока в максимуме (пучности), I_{ex} – амплитуда тока на входе вибратора; w – волновое сопротивление среды; r – расстояние от вибратора до точки наблюдения; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны; l – длина плеча вибратора; θ – угол между осью вибратора и направлением в точку наблюдения.

Напряженность магнитного поля в том же направлении и на том же расстоянии r от вибратора находится по формуле

$$H_{\varphi} = E_{\theta} / w. \quad (6.2)$$

Нормированная амплитудная ДН вибратора в плоскости, проходящей через ось вибратора (плоскость E), определяется выражением

$$\overline{F}_{\theta}(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sin \theta}. \quad (6.3)$$

Выражением (6.3) можно пользоваться при длине вибратора $2l \leq 5\lambda / 4$. Если $2l > 5\lambda / 4$, то необходимо сначала определить направление максимума излучения, а затем произвести нормировку. Для очень коротких вибраторов ($kl \ll 1$) имеем $\overline{F}_{\theta}(\theta) = \sin \theta$, что совпадает с ДН диполя Герца. Для полуволнового вибратора ($kl = \pi/2$) получаем

$$\overline{F}_{\theta}(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta}. \quad (6.4)$$

В плоскости, перпендикулярной оси (плоскость H), имеем $\overline{F}_{\theta}(\varphi) = 1$, т.е. ДН представляет собой окружность и симметричный вибратор направленностью излучения в этой плоскости не обладает.

При расположении симметричного вибратора над землей, которую обычно считают идеально проводящей, его называют горизонтальным. Амплитудная ДН горизонтального вибратора с учетом влияния земли находится по правилу перемножения диаграмм, т.е. нормированная амплитудная ДН вибратора в свободном пространстве умножается на множитель, который учитывает влияние земли. На низких частотах проводимость земли велика,

поэтому ее часто заменяют идеально проводящим экраном. Тогда горизонтальный вибратор, размещенный на высоте h над экраном (рис. 6.1, *a*), и его зеркальное изображение образуют систему двух противофазных вибраторов, расположенных на расстоянии $2h$ друг от друга. В результате нормированная ДН системы принимает вид

$$\bar{F}_\theta(\Delta, \theta) = \frac{\cos(kl \cos \Delta \cos \theta) - \cos(kl)}{(1 - \cos(kl))\sqrt{1 - (\cos \Delta \cos \theta)^2}} \sin(kh \sin \Delta), \quad (6.5)$$

где Δ – угол возвышения (между поверхностью земли и направлением в точку наблюдения), а θ – угол в горизонтальной плоскости, по-прежнему отсчитываемый от оси вибратора.

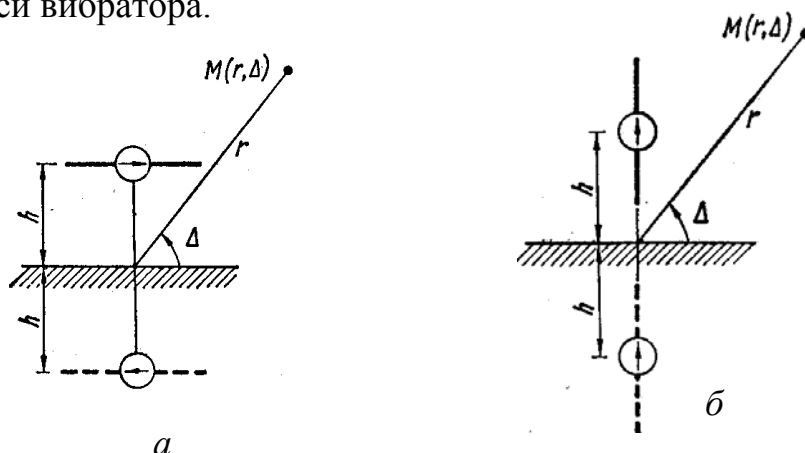


Рис. 6.1 – Горизонтальный (*a*) и вертикальный (*б*) вибраторы над экраном

Нормированная амплитудная ДН симметричного горизонтального вибратора в вертикальной плоскости, как и всякой горизонтальной антенны, зависит от высоты подвеса над землей и в плоскости, проходящей через центр вибратора перпендикулярно его оси, описывается выражением

$$\bar{F}_\theta(\Delta) = \sin(kh \sin \Delta). \quad (6.6)$$

В общем случае эта ДН имеет многолепестковый характер, причем максимумы излучения соответствуют углам возвышения лучей (в радианах)

$$\Delta_{\max} = \arcsin[(2q + 1)\lambda / (4h)], \quad (6.7)$$

где $q = 0, 1, 2, 3, \dots$ – номер луча.

Ближайший к поверхности земли лепесток ДН, определяющий наибольшую дальность связи, имеет угол возвышения луча, соответствующий значению $q = 0$. Направления нулевого излучения Δ_0 (в радианах) находят по формуле

$$\Delta_0 = \arcsin[q\lambda / (2h)]. \quad (6.8)$$

Для КНД в направлении максимума излучения ($\theta = \pi/2$) при $2l < 5\lambda/4$ имеем

$$D_0 = \frac{w}{\pi R_{\Sigma \max}} (1 - \cos kl)^2. \quad (6.9)$$

Для полуволнового вибратора $D_0 \approx 1,64$.

Эффективная или действующая длина симметричного вибратора относительно тока на входе при $l \leq \lambda/2$ определяется по формуле

$$l_{\text{эф}} = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{tg}(\pi l / \lambda). \quad (6.10)$$

Для полуволнового вибратора ($2l = \lambda/2$) действующая длина равна

$$l_{\text{эф}} = \lambda / \pi. \quad (6.11)$$

Для волнового вибратора ($2l = \lambda$) действующая длина будет в 2 раза больше.

Зная эффективную длину вибратора, можно найти его сопротивление излучения. Для вибратора длиной $2l \leq \lambda/2$, находящегося в воздушной среде, сопротивление излучения, отнесенное к току в точках питания, определяется по формуле

$$R_{\Sigma \text{ex}} \approx 800(l_{\text{эф}} / \lambda)^2, \text{ Ом}. \quad (6.12)$$

Сопротивление излучения, отнесенное к максимуму тока I_{max} , пересчитывают с использованием соотношения

$$R_{\Sigma \text{max}} = R_{\Sigma \text{ex}} \sin^2 kl. \quad (6.13)$$

Графическая зависимость сопротивления излучения $R_{\Sigma \text{max}}$ (в омах) от относительной длины плеча l/λ тонкого вибратора изображена на рис. 6.2, откуда следует, что сопротивление излучения тонкого полуволнового вибратора ($2l = \lambda/2$) примерно равно 73 Ом, а у волнового вибратора ($2l = \lambda$) составляет 200 Ом.

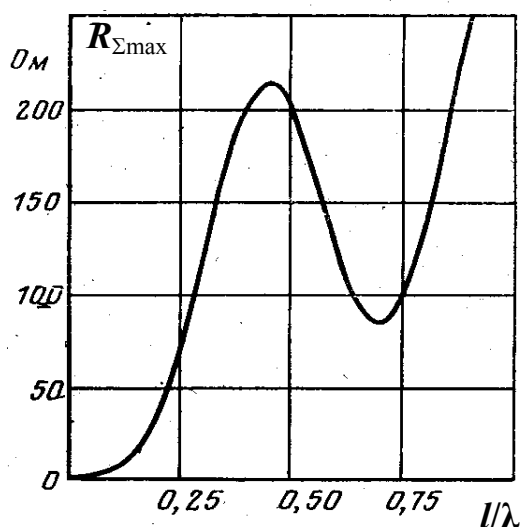


Рис. 6.2 – Сопротивление излучения симметричного вибратора

При небольших тепловых потерях, что обычно имеет место, для комплексного входного сопротивления симметричного вибратора (в омах) используется выражение

$$Z_{\text{ex}} \approx \frac{R_{\Sigma \text{max}} - iw_6 \cos kl \cdot \sin kl}{(R_{\Sigma \text{max}}/w_6)^2 + \sin^2 kl}, \quad (6.14)$$

в котором волновое сопротивление эквивалентной вибратору длинной линии, обычно называемое волновым сопротивлением вибратора, рассчитывается по формулам

$$w_6 = \frac{w}{\pi} [\ln(l/a) - 1] - \text{формула С. Щелкунова}, \quad (6.15)$$

$$w_6 = \frac{w}{\pi} [\ln(\lambda/\pi a) - 0,577] - \text{формула В. Н. Кессениха}, \quad (6.16)$$

a – радиус плеч вибратора, w – волновое сопротивление среды.

Для полуволнового вибратора формулы полностью совпадают. При $2l > \lambda/2$ формула (6.16) дает более точный результат. График зависимости активной и реактивной частей входного сопротивления симметричного вибратора от волновых размеров его плеча приведен на рис. 6.3.

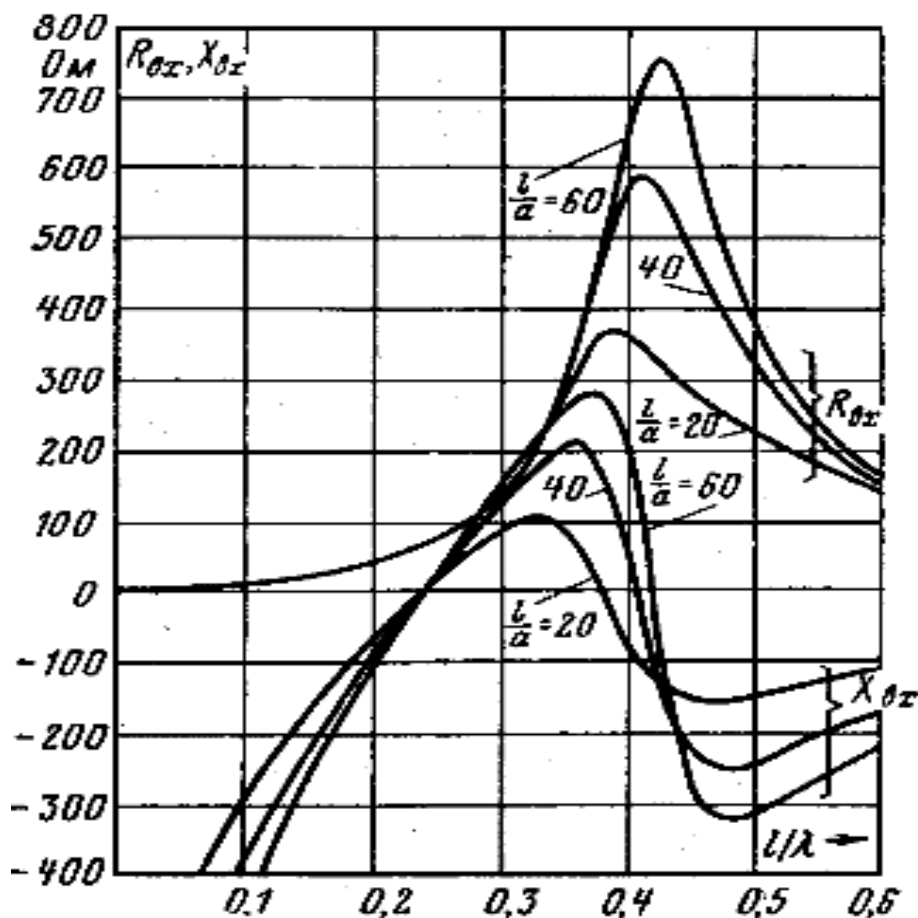


Рис. 6.3 – Входное сопротивление симметричного вибратора

Укорочение плеча симметричного вибратора, необходимое для его настройки в резонанс, рассчитывается по формуле

$$\Delta l = (1 - 1/\xi)0,25l, \quad (6.17, a)$$

где ξ – коэффициент укорочения волны в вибраторе, который можно найти из графика рис. 6.4.

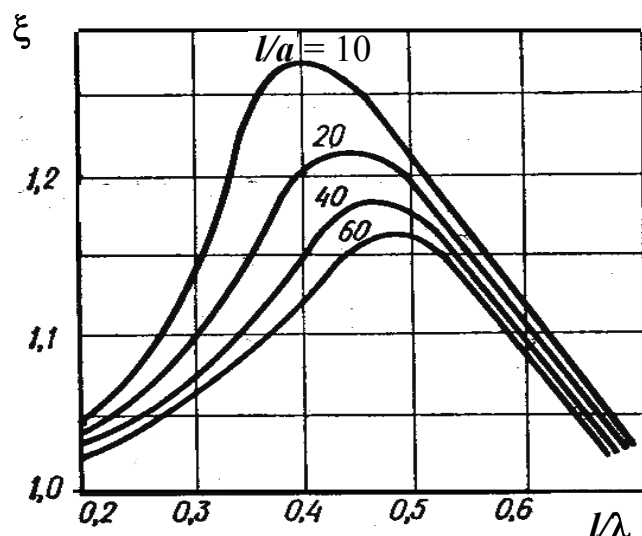


Рис. 6.4 – Коэффициент укорочения волны в вибраторе

Укорочение плеча вибратора можно оценить и по формуле

$$\Delta l \approx 6,8\lambda / w_e. \quad (6.17, b)$$

Относительная ширина полосы рабочих частот (в процентах) симметричного вибратора равна

$$\frac{\Delta f}{f_{cp}} \approx \frac{4 R_{\Sigma}}{\pi w_e} 100\%. \quad (6.18)$$

В зависимости от ширины полосы рабочих частот симметричный горизонтальный вибратор, обычно используемый в диапазонах коротких и ультракоротких волн, может выполняться как в виде одиночного провода, стержня или трубки, если работа происходит в узком частотном диапазоне, так и в виде системы параллельных проводов, расположенных по образующим цилиндрической поверхности (рис. 6.5), если необходимо обеспечить работу в более широкой полосе частот.

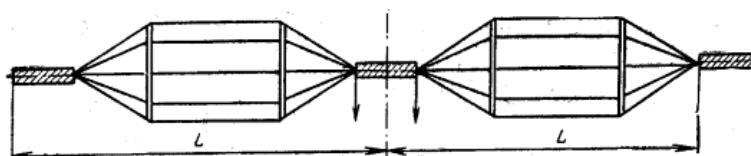


Рис. 6.5 – Вибратор Надененко

Последняя конструкция, разработанная применительно к диапазону коротких волн, называется вибратором Надененко. Сокращенно эти антенны обозначаются как ВГ $\frac{l}{h}$ – вибратор горизонтальный и ВГД $\frac{l}{h}a$ – вибратор горизонтальный диапазонный, где l – длина плеча, a – радиус плеч вибратора, h – высота его подвеса. Все значения берутся в метрах.

Наибольшее распространение получили полуволновые ($2l = \lambda/2$) симметричные вибраторы. Собственная (резонансная) длина волны такого вибратора, определяемая из условия обращения в нуль реактивной составляющей его входного сопротивления, без учета эффекта укорочения равна

$$\lambda_0 = 4l. \quad (6.19)$$

Волновые сопротивления полуволновых горизонтальных вибраторов могут быть найдены по формулам:

- для антенны ВГ

$$W_g = 120 \ln(0,175 \lambda_0 / a) \text{ Ом}, \quad (6.20)$$

где a – радиус плеч вибратора;

- для антенны ВГД

$$W_g = 120 \ln(0,175 \lambda_0 / a_{\text{эк}}) \text{ Ом}, \quad (6.21)$$

где $a_{\text{эк}}$ – эквивалентный радиус плеч вибратора, определяемый по формуле

$$a_{\text{эк}} = a \sqrt[N]{Nr_0 / a}. \quad (6.22)$$

В (6.22) a – радиус цилиндрической поверхности, образующей плечи вибратора; r_0 – радиус проводов; N – число проводов на цилиндрической поверхности вибратора. Если известен эквивалентный радиус $a_{\text{эк}}$ и необходимо определить соответствующий ему радиус a цилиндрической поверхности, образующей плечи вибратора, то пользуются формулой

$$a = \sqrt[N]{a_{\text{эк}}^N / (Nr_0)}. \quad (6.23)$$

Остальные параметры для антенны ВГД можно рассчитать по формулам:

относительная ширина полосы рабочих частот (в процентах)

$$\frac{2\Delta f}{f_{cp}} = 200 \left(1 - 0,64 \arctg \frac{W_g}{73,1} \right); \quad (6.24)$$

добротность

$$Q \approx 0,011 W_g; \quad (6.25)$$

входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} \approx W_g^2 / 73,1 \text{ Ом}. \quad (6.26)$$

Напряженность электрического поля (в милливольтгах на метр), создаваемая вибратором в направлении максимального излучения на расстоянии r (в километрах) от вибратора, определяется по формуле

$$E = 7\sqrt{P_{ex}} / r, \quad (6.27)$$

где P_{ex} – мощность, подводимая к антенне, Вт.

Напряженность магнитного поля (в миллиамперах на метр) в том же направлении и на том же расстоянии r от вибратора рассчитывается по формуле (6.2).

Линейная щелевая антенна

Магнитным аналогом симметричного электрического вибратора является антенна в виде узкой прямоугольной щели, прорезанной в плоском экране и возбуждаемой в центре высокочастотным напряжением $U_{щ}$. Размеры щели могут быть любыми, однако практически используются полуволновые ($2l \approx \lambda/2$) узкие ($b \ll \lambda$) щели, где $2l$ – длина щели, b – ее ширина.

Согласно принципу двойственности, излучение такой антенны эквивалентно излучению ленточного электрического вибратора, если размеры вибратора соответствуют размерам щели. В соответствии с этим принципом выполняют замены

$$I^e \rightarrow -I^m, \quad w \rightarrow -1/w, \quad \vec{E} \rightarrow \vec{H}, \quad \vec{H} \rightarrow \vec{E}.$$

В случае тонкой линейной двусторонней щели длиной $2l$, прорезанной в бесконечно протяженном плоском экране, из (6.1) и (6.2) с учетом принципа двойственности можно записать

$$H_\theta = \frac{U_{\max}}{\pi w} \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} \cdot \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}, \quad (6.28)$$

$$E_\varphi = -wH_\theta,$$

где U_{\max} – напряжение на щели в максимуме распределения.

Сопоставляя (6.1) с (6.28), замечаем, что обе антенны, вибраторная и щелевая, имеют одинаковые ДН, только плоскости поляризации у них развернуты на угол 90° друг относительно друга, поскольку в первом случае присутствует компонента поля E_θ , во втором E_φ . Выражение для U_{\max} найдем, приравняв компоненты напряженности электрических полей вибратора E_θ и щели E_φ . Получим связь $U_{\max} = -\frac{1}{2}wI_{\max}$.

Эквивалентное волновое сопротивление полуволнового щелевого вибратора в свободном пространстве определяется по формуле

$$W_{щ} \approx 120 \ln(0,71\lambda / b). \quad (6.29)$$

Укорочение полуволновой щели, необходимое для настройки ее в резонанс, равно

$$2\Delta l \approx 13,6\lambda / W_{щ}. \quad (6.30)$$

Входное сопротивление щелевого вибратора рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{вх}} \approx \frac{(60\pi)^2}{R_{\Sigma}^2 + (W_{\text{щ}} \text{ctg} kl)^2} (R_{\Sigma} + iW_{\text{щ}} \text{ctg} kl), \quad (6.31)$$

где $R_{\Sigma} \approx 73 \text{ Ом}$ – сопротивление излучения вибраторного аналога щели.

Несимметричный вертикальный вибратор

Несимметричный вертикальный заземленный вибратор является простейшей антенной на средних и коротких волнах и может выполняться как в виде вертикально подвешенного провода, так и в виде высокой стальной мачты с изолированными оттяжками.

По аналогии с разомкнутым на конце фидером в такой антенне существует режим стоячих волн, так что распределения тока и напряжения вдоль вибратора, как и в случае его симметричного аналога, имеют вид

$$I(z) = I_{\text{max}} \sin kz; \quad U(z) = U_{\text{max}} \cos kz, \quad (6.32)$$

где $I_{\text{max}}, U_{\text{max}}$ – амплитуды тока и напряжения в максимумах; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; z – расстояние от конца вибратора.

Максимальные значения тока и напряжения в антенне равны

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2P}{R_{\Sigma \text{max}} + R_{\Pi \text{max}}}}; \quad U_{\text{max}} = I_{\text{max}} w_{\text{г}}, \quad (6.33)$$

где P – мощность, подводимая к вибратору, Вт ; $R_{\Sigma \text{max}}, R_{\Pi \text{max}}$ – сопротивление излучения и сопротивление потерь, отнесенные к максимуму тока; $w_{\text{г}}$ – волновое сопротивление антенны относительно земли.

Хотя $w_{\text{г}}$ изменяется вдоль вибратора, возрастая к его концу, волновое сопротивление чаще всего считают постоянным, равным среднему значению

$$w_{\text{г}} = 60 \ln(0,575l/a), \quad (6.34)$$

где l и a – высота и радиус вибратора.

Собственная (резонансная) длина волны вибратора, определяемая из условия обращения в нуль реактивной составляющей его входного сопротивления, без учета эффекта укорочения равна

$$\lambda_0 = 4l. \quad (6.35)$$

Реактивную составляющую входного сопротивления несимметричного вертикального заземленного вибратора приближенно можно определить так же, как и входное сопротивление разомкнутого шлейфа без потерь:

$$Z_{\text{вх}} = -iw_{\text{г}} \text{ctg} kl, \text{ Ом}. \quad (6.36)$$

При работе на волне длиной $\lambda > \lambda_0$ электрическая высота вибратора $kl = 2\pi l/\lambda < \pi/2$, поэтому реактивная составляющая входного сопротивления антенны носит емкостный характер. Значение индуктивности (в микро-

генри) катушки самоиндукции, включаемой у основания вибратора для компенсации этой реактивности и увеличения его действующей высоты, определяется по формуле

$$L = \frac{w_e \lambda}{1880} \operatorname{ctg} kl. \quad (6.37)$$

При работе на волне длиной $\lambda < \lambda_0$ электрическая высота вибратора $kl = 2\pi l / \lambda > \pi/2$ и реактивная составляющая входного сопротивления антенны носит индуктивный характер. Значение емкости (в пикофарадах) конденсатора, включаемого у основания вибратора для его укорочения и компенсации индуктивности, можно рассчитать по формуле

$$C = \frac{530\lambda}{w_e} \operatorname{tg} kl. \quad (6.38)$$

Основную часть сопротивления потерь R_{II} в антенне составляют потери в земле и элементах настройки. Если R_{IIex} – сопротивление потерь, отнесенное к основанию вибратора, т.е. к его входу, то

$$R_{II \max} = R_{IIex} (I_{ex} / I_{\max})^2 = R_{IIex} \sin^2 kl, \text{ Ом}, \quad (6.39)$$

где I_{ex} – ток у основания антенны.

Сопротивление потерь R_{II} определяет КПД антенны

$$\eta = \frac{R_{\Sigma ex}}{R_{\Sigma ex} + R_{IIex}}, \quad (6.40)$$

где $R_{\Sigma ex}$ – сопротивление излучения, отнесенное к току у основания антенны и определяемое по формуле

$$R_{\Sigma ex} = R_{\Sigma \max} / \sin^2 kl. \quad (6.41)$$

Для практических расчетов антенн с размерами $l > \lambda/4$ всегда используют сопротивление излучения $R_{\Sigma \max}$, отнесенное к максимуму тока. В случае коротких антенн ($l < \lambda/4$), когда максимум функции распределения тока не попадает на антенну, используют сопротивление излучения $R_{\Sigma ex}$, отнесенное к току на входе вибратора. Эти величины связаны между собой соотношением (6.41). Сопротивление излучения несимметричного вибратора высотой l в два раза меньше сопротивления излучения симметричного вибратора с длиной плеча l . Сопротивление излучения короткой вертикальной антенны можно рассчитать также по формуле

$$R_{\Sigma ex} = 1600(l_{\text{эф}} / \lambda)^2, \text{ Ом}, \quad (6.42)$$

где $l_{\text{эф}}$ – эффективная или действующая высота антенны, равная

$$l_{\text{эф}} = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right). \quad (6.43)$$

При $l \ll \lambda$ имеем

$$l_{\text{эф}} = 0,5l. \quad (6.44)$$

Эффективная высота четвертьволнового вибратора ($l = \lambda/4$) равна

$$l_{\text{эф}} \cong 0,64l. \quad (6.45)$$

Амплитуда напряженности электрического поля (в вольтах на метр), создаваемого несимметричным вертикальным заземленным вибратором, находящимся в воздушном пространстве, на расстоянии r (в километрах) от вибратора, определяется по формуле

$$E_{\theta} = \frac{60I_{\text{max}}}{r} \cdot \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}, \quad (6.46)$$

где угол θ отсчитывается от оси вибратора.

В формулах, приведенных в задачниках Г.А. Шипкова и В.Ф. Хмеля [14 – 16], для расчета напряженности поля в пространстве используется функция нормированной ДН, поэтому у них в формулах типа (6.46) в знаменателе присутствует нормировочный множитель $(1 - \cos kl)$.

При определении амплитудной ДН поднятого над землей (экраном) вертикального вибратора (рис.6.1, б) последний вместе с его зеркальным изображением образует систему двух синфазных излучателей, центры которых расположены на расстоянии $2h$ друг от друга. Нормированная ДН зависит только от угла возвышения $\Delta = \pi/2 - \theta$ и имеет вид

$$\bar{F}_{\theta}(\Delta) = \frac{\cos(kl \sin \Delta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos \Delta} \cos(kh \sin \Delta). \quad (6.47)$$

Несимметричный вибратор (штырь) используется также в качестве возбуждателя в переходах с коаксиальной ЛП на другие типы линий (волноводные, полосковые). При возбуждении волны H_{10} в прямоугольном волноводе посредством коаксиально-волноводного перехода реактивная составляющая входного сопротивления возбуждающего штыря должна быть равна нулю согласно равенству

$$\frac{l_{\text{эф}}^2 Z_c}{ab} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} x_0 \right) \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda_g} l_2 \right) + X_{\text{ex}} = 0, \quad (6.48)$$

а активная составляющая входного сопротивления штыря должна быть равна волновому сопротивлению коаксиального фидера w_g :

$$2 \frac{l_{\text{эф}}^2 Z_c}{ab} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} x_0 \right) \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l_2 \right) = w_g. \quad (6.49)$$

В этих формулах: $l_{\text{эф}}$ – эффективная (действующая) высота штыря; Z_c – характеристическое сопротивление волновода для волны основного типа; l_2 – расстояние от штыря до торцевой стенки волновода; x_0 – положение штыря относительно узкой стенки волновода; X_{ex} – реактивная часть входного сопротивления штыря, находящегося в свободном пространстве. Геометрическая высота штыря l_1 определяется приближенно по формуле (6.43) для

штыря в свободном пространстве после подстановки в нее значения $l_{эф}$, найденного из (6.49) для штыря в волноводе.

Рамочные антенны

Рамочные антенны применяются в качестве направленных приемных антенн для радиосвязи, радиовещания, радиопеленгации, приема телевизионных трансляций и других целей. Простейшая рамочная антенна представляет собой один или несколько последовательно соединенных витков провода произвольной формы, располагаемых обычно в вертикальной плоскости (перпендикулярно поверхности земли). Периметры рамок выбираются значительно меньше длины волны ($l_p \leq 0,1\lambda$).

ЭДС (в вольтах), наводимая в такой антенне, как и для других типов антенн, определяется по формуле Неймана

$$\mathcal{E} = El_{эф}\bar{F}(\theta, \varphi)\cos\chi, \quad (6.50)$$

где E – напряженность электрического поля в месте приема; $l_{эф}$ – эффективная длина рамочной антенны; $\bar{F}(\theta, \varphi)$ – ее нормированная ДН; χ – угол между плоскостью поляризации проходящей волны и плоскостью рамки.

Эффективная длина рамочной антенны равна

$$l_{эф} = 2\pi N S_p / \lambda, \quad (6.51)$$

где N – число витков; S_p – площадь рамки; λ – длина волны.

Сопротивление излучения рамочной антенны определяется формулой

$$R_{\Sigma p} = 31200(NS_p / \lambda^2)^2, \text{ Ом.} \quad (6.52)$$

Для круглой рамки с периметром l_p формула (6.52) имеет вид

$$R_{\Sigma p} \approx 197N^2(l_p / \lambda)^4, \text{ Ом.} \quad (6.53)$$

Реактивная составляющая входного сопротивления рамки обычно носит индуктивный характер, и для ее компенсации (настройки рамки в резонанс) включают переменный конденсатор. Эффективная длина рамки при резонансе равна

$$l_{эф.p} = l_{эф}Q_p, \quad (6.54)$$

где Q_p – добротность колебательного контура рамки.

Линейные непрерывные системы

Для получения большей направленности излучения в одной из плоскостей (по одной из угловых координат) в антенной технике применяют линейные непрерывные системы (ЛНС). Под ЛНС будем понимать систему однотипных элементарных излучателей, непрерывно распределенных вдоль заданного направления в пространстве. Длина линейной системы произвольна, а ее поперечные размеры много меньше длины волны и ее продольных размеров.

Простейшей реализацией ЛНС является прямолинейный провод длиной L с бегущей вдоль него волной электрического тока. Распределение тока описывается функцией

$$I(z) = I_0 e^{ik\xi z}, \quad |z| \leq L/2, \quad (6.55)$$

где $I_0 = const$ – амплитуда тока, $k = 2\pi/\lambda$, $\xi = c/V_\phi$, c – скорость света;

V_ϕ – фазовая скорость волны тока вдоль провода.

Амплитуда тока в такой ЛНС предполагается постоянной, а фаза с расстоянием меняется по линейному закону. Значение $\xi = 0$ соответствует синфазному распределению тока. При $\xi < 1$ волна будет ускоренной, а в случае $\xi > 1$ – замедленной. Если $\xi = 1$, то волна тока распространяется со скоростью света.

Выражение для нормированного множителя направленности ЛНС имеет вид

$$\bar{f}_\Sigma(\theta) = \frac{1}{\psi} \sin \psi, \quad (6.56)$$

где

$$\psi = \frac{1}{2} kL(\cos \theta - \xi). \quad (6.57)$$

Положение главного максимума ДН определяется из условия $\psi = 0$, что дает

$$\theta_0 = \arccos \xi. \quad (6.58)$$

В случае синфазного возбуждения ($\xi = 0$) главный лепесток будет в направлении $\theta_0 = \pi/2$, т.е. имеет место режим поперечного излучения. При $0 < \xi < 1$ имеем режим наклонного излучения, когда главный максимум отклоняется от поперечного направления в сторону движения волны; при $\xi = 1$ он ориентирован строго в направлении оси системы. Это режим осевого излучения.

Ширина ДН (в радианах) при работе в первых двух режимах определяется по формулам:

на уровне 0,5 по мощности

$$2\theta_{0,5} \approx 0,89 \frac{\lambda}{L \sin \theta_0}; \quad (6.59)$$

на уровне нулевого излучения

$$2\theta_0 \approx 2 \frac{\lambda}{L \sin \theta_0}. \quad (6.60)$$

Уровень боковых лепестков ДН находится как

$$F_{q_{\max}}(\theta) \approx \frac{2}{(2|q| + 1)\pi}, \quad (6.61)$$

где $q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – номер бокового лепестка.

КНД в направлении максимума излучения ЛНС при работе в этих режимах рассчитывается по формулам

$$D_0 \approx 2,22L/\lambda, \text{ если } \xi < 1 - \lambda/L; \quad (6.62)$$

$$D_0 \approx 2L/\lambda, \text{ если } L \gg \lambda. \quad (6.63)$$

Соответствующие параметры ЛНС при работе в режиме осевого излучения определяются по формулам

$$2\theta_{0,5} \approx 1,88\sqrt{\lambda/L}; \quad (6.64)$$

$$2\theta_0 \approx 2,82\sqrt{\lambda/L}; \quad (6.65)$$

$$D_0 \approx 4,44L/\lambda, \text{ если } \xi < 1 - \lambda/L; \quad (6.66)$$

$$D_0 \approx 4L/\lambda, \text{ если } L \gg \lambda. \quad (6.67)$$

В режиме осевого излучения ЛНС может обеспечить максимальное (оптимальное) значение КНД

$$D_0^{opt} \approx 7,2L/\lambda, \quad (6.68)$$

при котором ширина ДН (в радианах) равна

$$2\theta_{0,5}^{opt} \approx 1,06\sqrt{\lambda/L}. \quad (6.69)$$

Оптимальный режим возможен, если длина ЛНС или коэффициент укорочения волны в ней оптимальны, т. е. удовлетворяют соотношениям

$$L_{opt} \approx \frac{\lambda}{2(\xi - 1)}; \quad \xi^{opt} \approx 1 + \lambda/(2L). \quad (6.70)$$

Основным недостатком синфазной ЛНС с постоянным амплитудным распределением является высокий уровень бокового излучения ($-13,2$ дБ). С целью уменьшения уровня боковых лепестков переходят к неравномерному амплитудному распределению, максимальному в центре и симметрично спадающему к краям, например типа

$$\bar{I}(z) = (1 - \delta) + \delta \cos(\pi z/L), \quad |z| \leq L/2, \quad (6.71)$$

где величина δ определяет относительное уменьшение амплитуды тока на концах, т.е. ее неравномерную составляющую.

Это нормированное распределение называется «косинус на пьедестале». В частном случае, при $\delta = 1$, имеем полностью спадающее к краям косинусоидальное распределение. Для нормированного множителя направленности системы в этом случае получаем

$$\bar{f}_\Sigma(\theta) = \frac{\cos \psi}{1 - \left(\frac{2}{\pi} \psi\right)^2}, \quad (6.72)$$

где

$$\psi = \frac{1}{2}kL \cos \theta . \quad (6.73)$$

Неравномерность амплитудного распределения приводит к уменьшению эффективной длины антенны, которая при амплитудном распределении типа (6.72) имеет значение

$$l_{\text{эф}} = \frac{2}{\pi} L . \quad (6.74)$$

Уменьшение эффективной длины ведет к расширению главного лепестка ДН до значения (в радианах)

$$2\theta_{0,5} \approx 1,19 \frac{\lambda}{L} . \quad (6.75)$$

Если линейность фазового распределения тока возбуждения нарушается, это приводит к изменению формы ДН и снижению КНД. В ряде случаев распределение тока в ЛНС можно описать выражением

$$i(z) = I_0 e^{i[\xi kz - \Phi(z)]}, \quad I_0 = \text{const} \quad (6.76)$$

и фазовые изменения представить как некоторую гладкую функцию, которая может быть разложена в ряд вида

$$\Phi(z) = \Phi_1 \left(2z/L\right) + \Phi_2 \left(2z/L\right)^2 + \Phi_3 \left(2z/L\right)^3 + \dots , \quad (6.77)$$

где $\Phi_n = \text{const}$ – максимальные фазовые отклонения (степени n) на краю системы, т.е. при $|z| = L/2$.

Если $\Phi(z) = 0$, то искажения отсутствуют. Изменения фазы первой степени (линейные) и третьей степени (кубические) при постоянном амплитудном распределении приводят к смещению максимума излучения. По отношению к ширине неискаженного луча это смещение определяется по формулам

$$\delta\theta_1 / (2\theta_{0,5}) \approx \Phi_1 / 2,78; \quad (6.78)$$

$$\delta\theta_3 / (2\theta_{0,5}) \approx \Phi_3 / 4,65, \quad (6.79)$$

где Φ_1 и Φ_3 – максимальные изменения фазы (в радианах) на краю ЛНС.

Цилиндрическая и коническая спиральные антенны

Подобные антенны относятся к антеннам бегущей волны, поле излучения которых в направлении оси имеет вращающуюся (круговую) поляризацию. Такие антенны широко используются в радиолокации для получения более контрастного изображения цели на фоне помех, а также при работе с летательными и космическими аппаратами, положение антенн которых в пространстве не стабилизировано. Спиральные антенны могут работать самостоятельно, являться элементом антенной решетки или облучателем зеркальной антенны.

Однозаходная цилиндрическая спиральная антенна (ЦСА) представляет собой проволочную спираль с постоянным шагом s , выполненную на цилиндрической поверхности радиуса $r = a$ (рис.6.6, а). Один конец

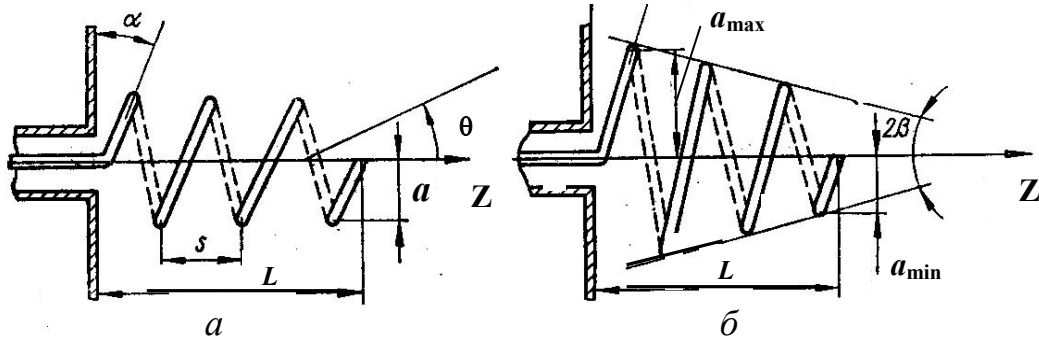


Рис. 6.6 – Цилиндрическая (а) и коническая (б) спиральные антенны

спирали остается свободным, а другой соединен с внутренним проводником коаксиальной линии. Внешний проводник коаксиальной линии присоединяется к металлическому экрану, имеющему форму диска или многоугольника. Экран служит для получения однонаправленного излучения и уменьшения токов, наводимых на внешнем проводнике коаксиального фидера. Диаметр экрана выбирается равным $(0,7...0,9)\lambda_{cp}$. Диаметр проводника спирали обычно на порядок меньше диаметра цилиндрической поверхности $2a$. Число витков $N = 4...8$. Осевая длина антенны L находится в пределах $(0,5...3,0)\lambda_{max}$. Геометрическими параметрами цилиндрической спирали также являются: l_1 – длина одного витка и α – угол намотки. Между геометрическими параметрами цилиндрической спирали существуют соотношения:

$$l_1^2 = (2\pi a)^2 + s^2; \quad \alpha = \arctg[s/(2\pi a)]; \quad L = Ns. \quad (6.80)$$

В зависимости от формы ДН и направления максимума излучения различают три режима: режим бокового или поперечного излучения ($2\pi a \ll \lambda$), режим осевого излучения ($2\pi a \cong \lambda$) и режим наклонного излучения ($2\pi a \gg \lambda$). Наиболее используемым является режим осевого излучения, обеспечивающий максимальный КНД и круговую поляризацию в направлении максимума ДН. Направление вращения плоскости поляризации совпадает с направлением намотки спирали. Угол намотки спирали α отсчитывается от нормали к оси антенны и выбирается в пределах $12^0...20^0$. Осевой режим сохраняется при условии

$$\cos \alpha / (1 + \sin \alpha) \leq ka \leq \cos \alpha / (1 - \sin \alpha). \quad (6.81)$$

Максимальный коэффициент перекрытия по частоте, равный двум, получается при $\alpha \cong 19^0$.

В режиме осевого излучения вдоль оси ЦСА распространяется замедленная волна. Это происходит при условии, что вдоль витка спирали укладывается одна длина волны, т.е.

$$l_1 = 2\pi a = \lambda. \quad (6.82)$$

Чтобы получить максимальный КНД антенны, согласно формуле (6.70), надо взять длину спиральной антенны, равной

$$L_{opt} = Ns = \frac{\lambda}{2(\xi - 1)}, \quad (6.83)$$

где $\xi = 1,1 \div 1,4$ – коэффициент замедления или коэффициент укорочения волны вдоль оси спирали.

Приближенный расчет нормированной ДН оптимальной ЦСА в плоскости $\varphi = const$ можно провести по формулам

$$\bar{F}_\theta(\theta) \cong J_0(k \sin \theta) \cos \theta \cdot |\sin \psi / \psi|, \quad (6.84)$$

$$\bar{F}_\varphi(\theta) \cong J_0(k \sin \theta) \cdot |\sin \psi / \psi|, \quad (6.85)$$

где $J_0(k \sin \theta)$ – функция Бесселя, $\psi = \frac{1}{2} kL(\cos \theta - \xi)$; угол θ отсчитывается от оси антенны.

Формулы получены по теореме о перемножении диаграмм направленности элемента системы в виде кольцевого излучателя с бегущей со скоростью света волной тока и множителя направленности ЛНС с бегущей вдоль нее замедленной волной, характеризуемой коэффициентом $\xi = c/V_\phi$. Формулы (6.84), (6.85) не учитывают отражение от конца спирали, затухание тока в ней и влияние экрана на характеристики излучения. Для оценки ширины ДН (в градусах) можно пользоваться выражениями

$$(2\theta_{0,5})_\theta \cong 85\sqrt{\lambda/L}, \quad (2\theta_{0,5})_\varphi \cong 108\sqrt{\lambda/L}. \quad (6.86)$$

В режиме осевого излучения ЦСА при оптимальном значении ξ , $N > 3$, $\alpha \leq 15^\circ$ характеризуют параметры:

КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 \approx 15(l_1/\lambda)^2 \frac{L}{\lambda}; \quad (6.87)$$

входное сопротивление (формула Крауса)

$$R_{ex} \approx 140l_1/\lambda, \text{ Ом}. \quad (6.88)$$

КНД в направлении максимума излучения можно также оценить по формуле

$$D_0 \cong 7,5(ka/\cos \alpha)^2 L/\lambda. \quad (6.89)$$

У конической спирали (рис. 6.6, б) длина витка и расстояние между витками являются переменными. Ее параметры: L – осевая длина; a_{\min} – минимальный радиус спирали; a_{\max} – максимальный радиус спирали; N – число витков; α – угол намотки; β – половина угла при вершине конуса. Геометрические размеры конической спирали определяются по формулам

$$a_{\min} = \frac{0,75\lambda_{\min} \operatorname{tg} \alpha \sin \beta}{\exp(2\pi \operatorname{tg} \alpha \sin \beta) - 1}; \quad a_{\max} = a_{\min} e^{2\pi N \operatorname{tg} \alpha \sin \beta}, \quad (6.90)$$

где λ_{\min} – нижняя длина волны рабочего диапазона антенны.

Конические спиральные антенны более широкополосны, но имеют меньший КНД из-за уменьшения числа витков, для которых выполняется условие режима осевого излучения $l = \lambda$. При оценке параметров конической спиральной антенны можно пользоваться формулами (6.86) – (6.88), если L заменить на $L \cos \beta$, а l_1 – на $l_{1cp} = \pi(a_{\max} + a_{\min})$.

Диэлектрические стержневые антенны

Конструкции диэлектрической стержневой антенны схематически показаны на рис.6.7 и состоят из двух основных частей: возбуждающего устройства, обычно в виде коаксиально-волноводного перехода на круглом волноводе с волной основного типа H_{11} , и круглого диэлектрического стержня, представляющего собой отрезок регулярного (цилиндрического) или

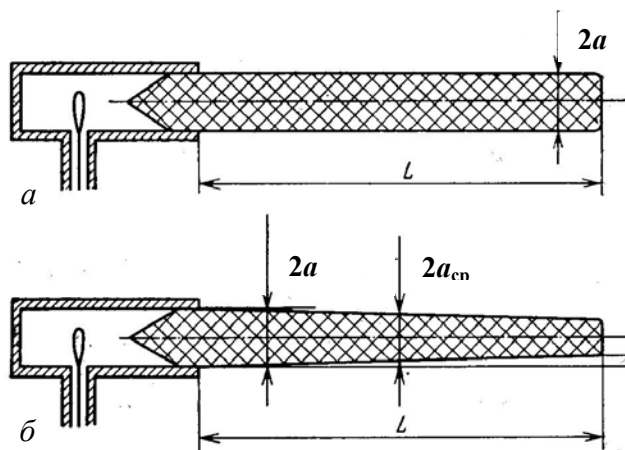


Рис. 6.7 – Диэлектрические стержневые антенны

нерегулярного (конического) диэлектрических волноводов. В отличие от полого металлического волновода, волны в диэлектрическом волноводе являются гибридными, т.е. имеют обе продольные составляющие электромагнитного поля. Основной является волна HE_{11} . Она не имеет критической длины волны, а структура ее поля в поперечном сечении близка к структуре поля волны H_{11} круглого волновода. По этим причинам подобные конструкции получили широкое применение в антенной технике в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Фазовая скорость волны, распространяющейся вдоль стержня, лежит в пределах $c/\sqrt{\varepsilon} < V_{\phi} < c$, где c – скорость света в вакууме, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня. Расчетные зависимости $\xi = c/V_{\phi}$ от $2a/\lambda$, где a – радиусы стержня и волновода, λ – длина волны в вакууме, для $\mu = 1$ и некоторых значений ε приведены на рис. 6.8.

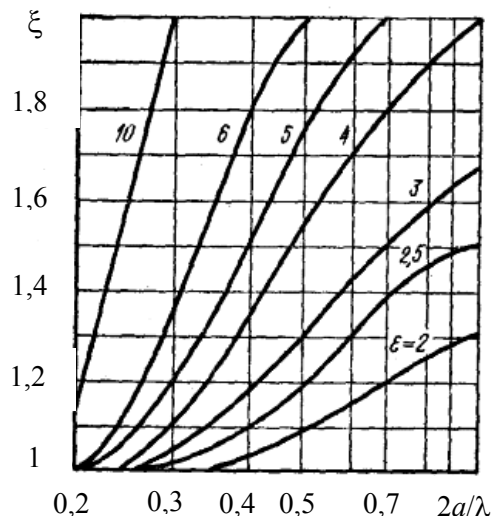


Рис. 6.8 – Зависимость коэффициента замедления ξ в диэлектрической антенне от ее волновых размеров

Приближенный расчет нормированной ДН диэлектрической стержневой антенны в плоскостях E ($\varphi = 0$) и H ($\varphi = \pi/2$) можно выполнить по формулам

$$\bar{F}_\theta(\theta) \cong J_0(k a \sin \theta) \cos \theta \cdot |\sin \psi / \psi|, \quad (6.91)$$

$$\bar{F}_\varphi(\theta) \cong J_0(k a \sin \theta) \cdot |\sin \psi / \psi|, \quad (6.92)$$

где $J_0(k a \sin \theta)$ – функция Бесселя, $\psi = \frac{1}{2} k L (\cos \theta - \xi)$; угол θ отсчитывается от оси антенны; L – длина диэлектрического стержня вне волноводной секции.

Формулы получены по теореме о перемножении диаграмм направленности элемента системы в виде открытого конца круглого волновода и МН ЛНС с бегущей вдоль нее замедленной волной с коэффициентом замедления ξ . Эти формулы не учитывают излучение от стыка диэлектрического стержня с волноводом и отражения от конца диэлектрического стержня, определяющие высокий уровень боковых лепестков, а также затухание в нем, вызванное излучением и тепловыми потерями. Поэтому совпадение теоретических и экспериментальных результатов возможно только в области главного лепестка ДН.

Известны и другие приближенные формулы, по которым можно рассчитать в главных плоскостях амплитудную ДН цилиндрической стержневой антенны, представляя ДН в виде множителей направленности ЛНС с соответствующими распределениями:

- в плоскости H ($\varphi = 0$)

$$\bar{f}(\theta^H) = \frac{\sin\left[\frac{\pi l}{\lambda}(\xi - \cos\theta^H)\right]}{\frac{\pi l}{\lambda}(\xi - \cos\theta^H)}, \quad (6.93)$$

- в плоскости $E(\varphi = \pi/2)$

$$\bar{f}(\theta^E) = \frac{\sin\left[\frac{\pi l}{\lambda}(\xi - \cos\theta^E)\right]}{\frac{\pi l}{\lambda}(\xi - \cos\theta^E)} \cos\theta^E, \quad (6.94)$$

где θ – угол между осью антенны и направлением в точку наблюдения.

Для получения максимального КНД диаметр $2a$ и длина L цилиндрического стержня (вне волноводной секции) должны иметь оптимальные размеры

$$2a^{opt} \cong \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\varepsilon - 1)}}, \quad L_{opt} \cong \frac{\lambda}{2(\xi - 1)}. \quad (6.95)$$

Необходимая величина ξ^{opt} при заданном значении ε обеспечивается соответствующим выбором радиуса стержня. Очевидно, что это можно выполнить на фиксированной длине волны. Обычно в качестве нее берется средняя длина волны рабочего диапазона. Из условия существования в круглом волноводе волны основного типа получается $\lambda_{cp} \cong 3a$.

При оптимальной длине диэлектрического стержня КНД антенны находят по формуле

$$D_0 \approx 8L_{opt} / \lambda. \quad (6.96)$$

Потери в диэлектрике, которые определяют КПД антенны, можно оценить по формуле (1.8). КПД диэлектрической антенны, зная погонное затухание, можно рассчитать по формуле (3.10). При оценке используют также среднее значение КПД, равное 0,85.

При расчете диэлектрической стержневой антенны по заданным значениям КНД или ширины ДН сначала по формулам (6.68) или (6.69) находят длину стержня L , далее по формуле (6.70) определяют коэффициент замедления ξ^{opt} , а затем по графикам на рис. 6.8 выбирают значения ε и диаметр стержня $2a$.

Для уменьшения излучения от стыка с волноводом и отражения от конца стержня ему придают коническую форму. При этом наибольший диаметр выбирают равным внутреннему диаметру волновода, а наименьший выбирают так, чтобы средний по длине антенны коэффициент замедления был близок к оптимальному, т.е.

$$\xi_{cp} = 0,5(\xi_{max} + \xi_{min}) \cong \xi^{opt}. \quad (6.97)$$

Оптимальные размеры конического стержня могут находиться также по формулам

$$\left. \begin{aligned} 2a_2^{opt} &= \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\varepsilon - 1)}}, & 2a_1^{opt} &= \frac{\lambda}{\sqrt{2,5\pi(\varepsilon - 1)}}, \\ L_{opt} &= \frac{1}{2(\xi_{cp} - 1)}. \end{aligned} \right\} \quad (6.98)$$

Амплитудные ДН конической стержневой антенны можно рассчитать по формулам (6.91) и (6.92) при условии замены конического стержня эквивалентным цилиндрическим стержнем.

Поляризация поля излучения стержневых диэлектрических антенн определяется поляризацией возбуждающего устройства.

6.2 Примеры решения типовых задач

1. Симметричный вибратор длиной $2l = 0,6$ м возбуждается током с амплитудой $I_0 = 0,3$ А на его входе и работает на частоте $f = 400$ МГц. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в точке наблюдения, находящейся на расстоянии $r = 100$ м от вибратора и под углом $\theta = \pi/3$ рад к его оси. Антенна находится в воздушной среде.

Решение. Расчет проводим по формулам (6.1) и (6.2). Сначала определим длину волны λ и электрический размер плеча kl . Они равны:

$$\lambda = c/f = 0,75 \text{ м}; \quad kl = 2\pi l/\lambda = 6,2816 \cdot 0,3/0,75 \cong 2,513.$$

Это значение kl вместе с исходными данными подставляем в формулы:

$$\begin{aligned} |E_\theta| &= \frac{120\pi \cdot 0,3}{2\pi \cdot \sin(2,513)} \cdot \left| \frac{\cos(2,513 \cdot 0/5) - \cos(2,513)}{100 \cdot \sin(\pi/3)} \right| \cong \frac{0,306}{0,866} \cdot |0,309 - 0,809| \cong \\ &\cong 0,177 \text{ (В/м)}; \end{aligned}$$

$$|H_\varphi| = 0,177/120\pi = 0,469 \text{ (мА/м)}.$$

2. Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $2l = 0,96$ м, выполненного из провода диаметром $2a = 20$ мм, если длина волны $\lambda = 1$ м.

Решение. Сначала определим волновое сопротивление вибратора. По формуле (6.16) получаем

$$w_g = \frac{120\pi}{\pi} [\ln(l/\pi \cdot 10^{-2}) - 0,577] \cong 344 \text{ (Ом)}.$$

Учитывая, что сопротивление излучения волнового вибратора $R_{\Sigma max} \approx 200$ Ом, по формуле (6.14) имеем

$$Z_{ex} \approx \frac{200 - i344 \cdot \cos(2\pi \cdot 0,48/1) \cdot \sin(2\pi \cdot 0,48/1)}{(200/344)^2 + \sin^2(2\pi \cdot 0,48/1)} \approx (570 + i120), \text{ Ом}.$$

3. С целью настройки в резонанс определить укорочение симметричного волнового вибратора, выполненного из провода диаметром $2a/\lambda = 0,02$.

Решение. В рассматриваемом случае $l/\lambda = 0,5$; $l/a = 50$. Из рис. 6.4 определяем $\xi = 1,17$. По формуле (6.17, а) находим

$$\Delta l = (1 - 1/\xi) \cdot 0,25l = \left(1 - \frac{1}{1,17}\right) \cdot 0,25 \cdot 0,5\lambda \approx 0,018\lambda,$$

т.е. укорочение вибратора составляет $2\Delta l = 0,036\lambda$. Примерно такое же значение получаем и по формуле (6.17, б).

4. Определить волновое сопротивление на резонансной частоте и относительную ширину полосы рабочих частот антенны ВГД $\frac{10}{h} 0,6$, состоящей из $N = 6$ проводов радиусом $r_0 = 2$ мм каждый.

Решение. По формуле (6.22) находим эквивалентный радиус антенны

$$a_{\text{экв}} = a \sqrt[N]{\frac{N \cdot r_0}{a}} = 0,6 \sqrt[6]{\frac{6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,6}} \text{ м} \approx 0,31 \text{ м}.$$

Согласно формуле (6.19), резонансная длина волны антенны

$$\lambda_0 = 4l = 4 \cdot 10 \text{ м} = 40 \text{ м}.$$

По формулам (6.21) и (6.24) получаем

$$W_e = 120 \ln \left(0,175 \frac{\lambda_0}{R_g} \right) = 120 \ln \left(0,175 \cdot \frac{40}{0,13} \right) \text{ Ом} \approx 374 \text{ Ом};$$

$$\frac{2\Delta f}{f_0} = 200 \left(1 - 0,64 \operatorname{arctg} \frac{W_e}{73,1} \right) = 200 \left(1 - 0,64 \operatorname{arctg} \frac{374}{73,1} \right) \approx 23\%.$$

5. Полуволновая резонансная щелевая антенна имеет ширину $b = 1$ см и работает на волне $\lambda = 60$ см. Определить входное сопротивление антенны.

Решение. Найдем сначала эквивалентное волновое сопротивление и резонансную длину щели. Пользуясь формулами (6.29) и (6.30), получаем $w_{\text{щ}} \approx 120 \ln(0,71\lambda/b) = 120 \ln(0,71 \cdot 60) = 450$ (Ом);

$$2\Delta l \approx 13,6\lambda / w_{\text{щ}} = 13,6 \frac{60}{450} \approx 1,8 \text{ (см)}, \quad 2l = \lambda/2 - 2\Delta l = 60/2 - 1,8 = 28,2 \text{ (см)}.$$

По формуле (6.31) имеем

$$Z_{\text{вх}} \approx \frac{(60\pi)^2}{73^2 + \left(450 \operatorname{ctg} \frac{\pi \cdot 28,2}{60} \right)^2} \cdot \left(73 + i 450 \operatorname{ctg} \frac{\pi \cdot 28,2}{60} \right) \approx (342 + i 222), \text{ Ом}.$$

6. К несимметричному вертикальному заземленному вибратору, работающему на резонансной длине волны, подводится мощность $P = 10$ кВт. Частота передатчика $f = 750$ кГц. Определить эффективную высоту, КПД,

ток у основания антенны и максимальную напряженность электрического поля на расстоянии $r = 12$ км от вибратора. Сопротивление потерь в антенне $R_{\Pi} = 7$ Ом.

Решение. Высоту вибратора, работающего на резонансной длине волны, находим из формулы (6.35), вычислив предварительно длину волны передатчика:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{750 \cdot 10} = 400(\text{м}); \quad l = \frac{\lambda}{4} = \frac{400}{4} = 100(\text{м}).$$

Эффективную высоту вибратора определяем по формуле (6.45):
 $l_{\text{эф}} \cong 0,64l = 0,64 \cdot 100 = 64(\text{м}).$

Сопротивление излучения четвертьволнового вибратора, отнесенное к максимуму тока, в два раза меньше сопротивления излучения симметричного полуволнового вибратора, т.е. $R_{\Sigma \text{max}} \approx 37$ Ом. По формуле (6.33) получаем

$$I = I_{\text{max}} \sin kl = \sqrt{\frac{2P}{R_{\Sigma \text{max}} + R_{\Pi}}} \sin \frac{2\pi l}{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot 10^3}{37 + 7}} \sin \frac{2\pi}{4} = 21,4 (\text{А}).$$

КПД антенны рассчитываем по формуле (6.40), а напряженность электрического поля – по формуле (6.46), полагая в максимуме $\theta = \pi/2$:

$$\eta = \frac{37}{37 + 7} \approx 0,84; \quad E_{\text{max}} = \frac{60I_{\text{max}}}{r} = \frac{60 \cdot 21,4}{12 \cdot 10^3} = 107(\text{мВ/м}).$$

7. Прямоугольный волновод с размерами $a = 23$ мм, $b = 10$ мм возбуждается на волне типа H_{10} посредством коаксиально-волноводного перехода. Волновое сопротивление коаксиального фидера $w_{\text{эф}} = 50$ Ом. Длина волны в свободном пространстве $\lambda = 3,2$ см. Найти высоту штыря l_1 и размеры l_2 и x_0 , определяющие его положение в волноводе.

Решение. Длина волны основного типа в волноводе

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{3,2}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,2}{4,6}\right)^2}} = 4,45 \text{ см.}$$

Характеристическое сопротивление волновода на волне основного типа

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,2}{4,6}\right)^2}} = 524 \text{ Ом.}$$

Эффективную высоту штыря определим, предполагая, что он находится в середине широкой стенки волновода ($x_0 = a/2$) и на расстоянии $l_2 = \lambda_{\text{в}}/4$ от торцевой стенки. Из условия согласования коаксиальной линии с волноводом (6.49) имеем

$$l_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{w_6 ab}{2Z_c \sin^2\left(\frac{\pi}{a} y_0\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_6} l_2\right)}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_6} \cdot \frac{\lambda_6}{4}\right)}} = 3,31 \text{ мм.}$$

Этой действующей высоте штыря в предположении, что он находится в свободном пространстве, соответствует геометрическая высота l_1 , которая находится из формулы (6.43):

$$l_1 = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi l_{\text{эф}}}{\lambda} = \frac{3,2}{3,1416} \operatorname{arctg} \frac{6,28 \cdot 3,31}{32} = 5,9 \text{ мм.}$$

Как видим, расстройка вибратора велика, поскольку его высота l_1 существенно отличается от $\lambda/4 = 8 \text{ мм}$. В целях увеличения l_1 при сохранении условия $R_{\text{ex}} = w_6$ смещаем вибратор к одной из узких стенок волновода. Принимаем $x_0 = 0,25a$ и тогда

$$l_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{w_6 ab}{2Z_c \sin^2\left(\frac{\pi}{a} x_0\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_6} l_2\right)}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2(0,25\pi) \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right)}} = 4,68 \text{ мм,}$$

$$l_1 = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi l_{\text{эф}}}{\lambda} = \frac{32}{3,1416} \operatorname{arctg} \frac{6,28 \cdot 4,68}{32} = 7,56 \text{ мм.}$$

Выберем радиус штыря равным $1,6 \text{ мм}$ и по (6.34) вычислим его волновое сопротивление, которое составит $w_{\text{вн}} = 60 \text{ Ом}$. Поскольку штырь не настроен в резонанс ($l_1 < \lambda/4$), его входное сопротивление содержит также и реактивную составляющую

$$X_{\text{ex}} = -w_{\text{вн}} \operatorname{ctg} \beta l_1 = -w_{\text{вн}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi \cdot 7,56}{32} \right) = -60 \cdot 0,0875 = -5,25 \text{ Ом.}$$

Для ее компенсации необходимо изменить расстояние l_2 от поршня до штыря в соответствии с формулой (6.48), чтобы значение реактивности осталось прежним, а знак изменился на противоположный. Тогда

$$\sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_6} l_2\right) = \frac{-X_{\text{ex}} ab}{l_{\text{эф}}^2 Z_c \sin^2\left(\frac{\pi}{a} x_0\right)} = \frac{5,25 \cdot 10 \cdot 23}{4,68^2 \cdot 524 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 0,25a}{a}\right)} = 0,21;$$

$$\frac{4\pi}{\lambda_6} l_2 = 0,21; \quad l_2 = \frac{44,5 \cdot 0,21}{12,57} = 7,43 \text{ мм.}$$

8. Рассчитать цилиндрическую спиральную антенну осевого излучения, работающую в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{min}} = 6 \text{ см}$ до $\lambda_{\text{max}} = 10 \text{ см}$. В процессе расчета для крайних длин волн рабочего диапазона определить число витков спирали, шаг намотки, КНД, входное сопротивление антенны и ширину ДН.

Решение. Сначала определяем среднюю длину волны рабочего диапазона:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}{2} = \frac{6 + 10}{2} = 8 \text{ см.}$$

Так как антенна должна иметь максимум излучения вдоль оси, то длину витка спирали принимаем равной средней длине волны диапазона. Поэтому

$$l_1 = \lambda_{cp} = 8 \text{ см.}$$

Выбираем угол намотки спирали α равным 15° , имея в виду, что оптимальные значения этого угла лежат в пределах от 12° до 20° . Определяем шаг намотки:

$$s = 2\pi a \sin \alpha = 8 \sin 15^\circ = 8 \cdot 0,259 = 2,07 \text{ см.}$$

При вычислении осевой длины антенны исходим из того, что оптимальное значение коэффициента замедления на минимальной длине волны должно быть равным $\xi = c/V_\phi \approx 1,2$. Поэтому

$$\xi = 1 + \frac{\lambda_{\min}}{2L} = 1,2 ,$$

что соответствует

$$L = \frac{\lambda_{\min}}{2 \cdot 0,2} = \frac{6}{0,4} = 15 \text{ см.}$$

Число витков спирали равно

$$n = \frac{L}{s} = \frac{15}{2,07} = 7,25.$$

Округляем n до семи и уточняем осевую длину спирали

$$L = ns = 7 \cdot 2,07 = 14,5 \text{ см.}$$

КНД в направлении максимума излучения для крайних длин волн рабочего диапазона вычисляем по формуле (6.87):

$$D_0 \approx 15 \left(\frac{l_1}{\lambda_{\min}} \right)^2 \frac{L}{\lambda_{\min}} = 15 \left(\frac{8}{6} \right)^2 \frac{14,5}{6} = 64,3 = 18,1 \text{ дБ;}$$

$$D_0 \approx 15 \left(\frac{l_1}{\lambda_{\max}} \right)^2 \frac{L}{\lambda_{\max}} = 15 \left(\frac{8}{10} \right)^2 \frac{14,5}{10} = 17,4 = 12,4 \text{ дБ.}$$

Ширину ДН находим по формулам (6.86):

$$(2\theta_{0,5})_\theta \cong 85 \sqrt{\lambda/L} = 85 \sqrt{6/14,5} \cong 54,8^\circ ;$$

$$(2\theta_{0,5})_\theta \cong 85 \sqrt{\lambda/L} = 85 \sqrt{10/14,5} \cong 70,8^\circ ;$$

$$(2\theta_{0,5})_\phi \cong 108 \sqrt{\lambda/L} = 108 \sqrt{6/14,5} \cong 69,6^\circ ;$$

$$(2\theta_{0,5})_\phi \cong 108 \sqrt{\lambda/L} = 108 \sqrt{10/14,5} \cong 90^\circ .$$

Входное сопротивление антенны для крайних длин волн рабочего диапазона в соответствии с формулой (6.88) равно

$$R_{ex} \approx 140 \frac{l_1}{\lambda_{\min}} = 140 \frac{8}{6} = 186 \text{ Ом;}$$

$$R_{ex} \approx 140 \frac{l_1}{\lambda_{max}} = 140 \frac{8}{10} = 112 \text{ Ом.}$$

9. Для работы на волне длиной $\lambda = 7 \text{ см}$ рассчитать коническую диэлектрическую стержневую антенну оптимальных размеров с максимальным коэффициентом усиления не менее $G_0 = 30$. В процессе расчета определить: длину L , максимальный d_{max} и минимальный d_{min} диаметры стержня; коэффициент замедления; затухание, вызванное тепловыми потерями в стержне; КНД и КУ антенны. В качестве материала для изготовления стержня взять диэлектрик ($\varepsilon = 2,5$; $tg\sigma = 2 \cdot 10^{-3}$).

Решение. Сначала определяем ориентировочное значение длины стержня L , поскольку этот размер антенны в первую очередь ограничивает возможность ее реализации. Среднее значение КПД диэлектрической антенны в первом приближении берем равным $\eta = 0,85$. Поэтому КНД должен быть не менее

$$D_0 = \frac{G_0}{\eta} = \frac{30}{0,85} = 35.$$

Для получения такого КНД стержень оптимальных размеров должен согласно (6.96) иметь длину

$$L_{opt} = \frac{D_0 \lambda}{8} = \frac{35 \cdot 7}{8} \cong 30,6 \text{ см.}$$

Этот размер антенны можно считать приемлемым.

Максимальный и минимальный диаметры стержня равны

$$d_{max} = 0,565 \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon - 1}} = \frac{0,565 \cdot 7}{\sqrt{2,5 - 1}} = 3,2 \text{ см,}$$

$$d_{min} = 0,355 \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon - 1}} = \frac{0,355 \cdot 7}{1,225} = 2 \text{ см.}$$

Средний диаметр имеет значение $d_{cp} = \frac{d_{min} + d_{max}}{2} = \frac{2 + 3,2}{2} = 2,6 \text{ см,}$

поэтому $\frac{d_{cp}}{\lambda} = \frac{2,6}{7} = 0,37$. Из графика на рис. 6.8. находим коэффициент за-

медления $\xi \cong 1,1$ и по нему длину волны в стержне $\lambda_g = \frac{\lambda}{\xi} = \frac{7}{1,1} = 6,3 \text{ см.}$

По формуле (6.70) уточняем длину стержня L_{opt} :

$$L_{opt} = \frac{\lambda}{2(\xi - 1)} = \frac{7}{2(1,1 - 1)} = 35 \text{ см.}$$

Затухание, обусловленное тепловыми потерями в диэлектрическом стержне, приближенно находим по формуле (1.8). Оно равно

$$\alpha_0 \cong \frac{27,3 \cdot \sqrt{2,5}}{0,07} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cong 1,24 \text{ дБ/м.}$$

КПД антенны находим по формуле (3.10):

$$\eta = \exp(-0,23\alpha_{\delta}L_{opt}) = \exp(-0,23 \cdot 1,24 \cdot 0,35) \approx 0,9.$$

КНД в направлении максимума излучения в соответствии с (6.96) равен

$$D_0 = 8 \frac{L}{\lambda} = 8 \frac{35}{7} = 40.$$

Максимальный КУ антенны имеет значение

$$G_0 = D\eta = 40 \cdot 0,9 \approx 36,$$

что вполне удовлетворяет заданию.

10. Определить оптимальные размеры конической стержневой антенны из тролитула ($\varepsilon = 2,5$; $tg \delta = 5 \cdot 10^{-3}$). Рабочая длина волны $\lambda = 7$ см.

Решение. Используя соотношения (6.98), находим оптимальные диаметры стержня:

$$2a_{\max} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\varepsilon - 1)}} = \frac{7}{\sqrt{\pi \cdot 1,5}} \text{ см} \approx 3,22 \text{ см};$$

$$2a_{\min} = \frac{\lambda}{\sqrt{2,5\pi(\varepsilon - 1)}} = \frac{7}{\sqrt{2,5\pi \cdot 1,5}} \text{ см} \approx 2,03 \text{ см}.$$

Среднему диаметру стержня $d_{cp} = \frac{2a_{\max} + 2a_{\min}}{2} = \frac{3,22 + 2,03}{2} = 2,625$ см, со-

гласно графику на рис. 6.8, соответствует коэффициент замедления $\xi_{cp} = 1,06$. Поэтому оптимальная длина стержня равна

$$L_{opt} = \frac{\lambda}{2(\xi_{cp} - 1)} = \frac{7}{2(1,06 - 1)} \text{ см} \approx 58,5 \text{ см}.$$

Остальные параметры антенны можно рассчитать по методике, изложенной выше.

6.3 Задачи для самостоятельного решения

6.1. Определить эффективную длину симметричного полуволнового вибратора, работающего на частоте $f = 30$ МГц.

Ответ: $l_{эф} = 3,18$ м.

6.2. Определить напряжение U_n на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору длиной $2l = 10$ м, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 50$ мкВ/м. Входное сопротивление приемника $R_n = 160$ Ом, сопротивление потерь в антенне $R_{л} = 10$ Ом.

Ответ: $U_n = 186$ мкВ.

6.3. Симметричный полуволновой вибратор соединен с приемником при помощи фидера с волновым сопротивлением 177 Ом. Амплитуда напряженности электрического поля в точке приема на волне длиной $31,4$ м составляет 50 мкВ/м. Какими будут амплитуда напряжения и мощность на входе прием-

ника, если его входное сопротивление равно 177 Ом ? Потерями в антенне и фидере пренебречь.

Ответ: 354 мкВ ; $7 \times 10^{-10} \text{ Вт}$.

6.4. Определить максимальную мощность, которую может отдать в согласованную нагрузку приемный полуволновой вибратор длиной 10 м при напряженности электрического поля в точке приема 100 мкВ/м . Найти эффективную площадь вибратора, пренебрегая потерями.

Ответ: $1,4 \times 10^{-9} \text{ Вт}$; 52 м^2 .

6.5. Определить эффективную площадь симметричного приемного вибратора без потерь длиной $2l = 3\lambda/4$. Во сколько раз эта площадь больше эффективной площади приемного полуволнового ($2l = \lambda/2$) вибратора?

Ответ: $S_{\text{эф}} \approx 0,16\lambda^2$; в 1,2 раза.

6.6. Два симметричных полуволновых вибратора без потерь расположены на расстоянии $r = 1000 \text{ м}$ друг от друга так, что их оси параллельны между собой и перпендикулярны прямой, проходящей через центры вибраторов. Один из вибраторов работает в режиме передачи, другой – в режиме приема. Длина волны генератора $\lambda = 1 \text{ м}$. Определить мощность, выделяемую в согласованной нагрузке приемного вибратора, если известно, что амплитуда тока на входе передающего вибратора равна 1 А . Определить также эффективную длину приемного вибратора и амплитуду ЭДС, наведенной в этом вибраторе электромагнитной волной, излучаемой передающим вибратором.

Ответ: $P_{\text{max}} = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$; $l_{\text{эф}} = 0,32 \text{ м}$; $\mathcal{E}_{\text{max}} = 0,02 \text{ В}$.

6.7. Определить частоту передатчика, на которой будет настроен в резонанс подключенный к нему симметричный волновой вибратор, имеющий длину $2l = 20 \text{ см}$ и диаметр $2a = 10 \text{ мм}$.

Ответ: $f = 1,635 \text{ ГГц}$.

6.8. Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $2l = 24 \text{ см}$, выполненного из провода диаметром $2a = 16 \text{ мм}$, если длина волны генератора $\lambda = 25 \text{ см}$.

Ответ: $Z_{\text{ex}} = (198 + i53,4) \text{ Ом}$.

6.9. Симметричный вибратор длиной $2l = 0,4 \text{ м}$ работает на частоте 600 МГц . Определить КНД в направлении максимума ДН.

Ответ: $D_0 = 1,92$.

6.10. Симметричный полуволновой вибратор расположен горизонтально на высоте $h = \lambda/2$ над идеально проводящей плоскостью. Определить полное входное сопротивление вибратора (с учетом экрана), отнесенное к току в максимуме распределения.

Ответ: $Z_{\text{ex}} = (69,1 + i24,8) \text{ Ом}$.

6.11. Заземленный вертикальный вибратор высотой 50 м предназначен для попеременной работы на волнах длиной 220 м и 1000 м . Определить на

этих волнах действующие высоты и сопротивления излучения, отнесенные к токам в точках питания вибратора. Определить также собственную длину волны вибратора без учета эффекта укорочения.

Ответ: $l_{эф1} = 30 \text{ м}; R_{\Sigma ex1} = 29,5 \text{ Ом}; l_{эф2} = 26 \text{ м}; R_{\Sigma ex2} = 1,1 \text{ Ом}; \lambda_0 = 200 \text{ м}.$

6.12. Определить амплитуду тока у основания несимметричного вертикального заземленного вибратора, если мощность, подводимая к нему, $P = 40 \text{ кВт}$, а входное сопротивление вибратора $R_{ex} = 80 \text{ Ом}$.

Ответ: $I_{ex} \approx 31,6 \text{ А}.$

6.13. Определить максимальную напряженность электрического и магнитного полей, создаваемых несимметричной вертикальной заземленной четвертьволновой антенной в точке приема на расстоянии $r = 120 \text{ км}$ от антенны, если подводимая к ней мощность $P = 10 \text{ кВт}$, а полная активная составляющая входного сопротивления $R_{ex} = 40 \text{ Ом}$.

Ответ: $E = 11,2 \text{ мВ/м}; H = 29,8 \text{ мкА/м}.$

6.14. Несимметричный вертикальный заземленный вибратор имеет параметры: диаметр цилиндрической поверхности вибратора $2a = 1,5 \text{ м}; N = 6; 2r_0 = 4 \text{ мм}$. Каким должен быть диаметр цилиндрической поверхности вибратора, чтобы при $N = 8$ и $2r_0 = 6 \text{ мм}$ он имел такое же волновое сопротивление, как и в первом случае?

Ответ: $2a = 1,12 \text{ м}.$

6.15. Резонансная щелевая полуволновая антенна имеет длину $2l = 14 \text{ см}$ и принимает сигналы частотой $f = 1 \text{ ГГц}$. Определить ширину щели.

Ответ: $b \approx 0,7 \text{ см}.$

6.16. Определить длину синфазной равноамплитудной линейной антенны, если ширина главного лепестка ДН по нулевым значениям поля составляет 60° , а длина волны равна 1 м . Какова амплитуда первого бокового лепестка относительно главного?

Ответ: $2 \text{ м}; 0,21.$

6.17. Определить максимальный КНД и ширину ДН линейного непрерывного источника, работающего в режиме осевого излучения, если оптимальная длина излучателя $L^{opt} = 10\lambda$.

Ответ: $D_0^{opt} = 72; \theta_{0,5}^{opt} \approx 0,335 \text{ рад}.$

6.18. Цилиндрическая спиральная антенна состоит из 6 витков, шаг спирали 2 см , длина витка 10 см , длина волны 10 см . Определить ширину ДН (в градусах), максимальный КНД и входное сопротивление антенны.

Ответ: $47^\circ; D_0 = 18; R_{ex} = 140 \text{ Ом}.$

6.19. Определить оптимальные размеры и максимальный КНД цилиндрической стержневой антенны из полистирола ($\epsilon = 2,5$), работающей на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$.

Ответ: $2a^{opt} \approx 4,6 \text{ см}; L^{opt} \approx 38,5 \text{ см}; D_0 \approx 30,8.$

7 АПЕРТУРНЫЕ АНТЕННЫ

7.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения

Плоские излучающие раскрывы

Для получения направленного излучения по обеим угловым координатам в диапазоне СВЧ широко применяются антенны с излучающими или отражающими поверхностями. Подобные антенны называются апертурными. Их характеристики излучения зависят как от формы поверхности, так и от амплитудно-фазового распределения поля, возбуждаемого на поверхности антенны сторонним полем или источником. При этом наибольшую направленность обеспечивает плоская синфазная поверхность с постоянным амплитудным (равноамплитудным) распределением.

Если излучающая поверхность S_p имеет прямоугольную форму, то в дальней зоне ее нормированные амплитудные ДН описываются выражениями:

- в плоскости E ($\varphi = 0$):

$$\bar{F}(\theta^E) = \frac{\sin(0,5kb_p \sin \theta^E)}{0,5kb_p \sin \theta^E} \cdot \frac{1 + \cos \theta^E}{2}; \quad (7.1)$$

- в плоскости H ($\varphi = \pi/2$):

$$\bar{F}(\theta^H) = \frac{\sin(0,5ka_p \sin \theta^H)}{0,5ka_p \sin \theta^H} \cdot \frac{1 + \cos \theta^H}{2}, \quad (7.2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны;

a_p и b_p – размеры раскрыва антенны (апертуры);

θ – угол в радианах между нормалью к поверхности антенны (ось Oz) и направлением в точку наблюдения.

Ширина ДН апертурных антенн и уровень боковых лепестков в соответствующих плоскостях могут быть найдены по формулам (6.59) – (6.61) для ЛНС, в которых следует положить $\theta_0 = \pi/2$.

При спадающем до нуля косинусоидальном распределении поля вдоль одной из осей прямоугольной излучающей поверхности, например, вдоль оси Oy , нормированная амплитудная ДН антенны в плоскости, проходящей через данную ось (плоскость H), имеет вид

$$\bar{F}(\theta^H) = \frac{\cos(0,5ka_p \sin \theta^H)}{(0,5\pi)^2 - (0,5ka_p \sin \theta^H)^2} \cdot \frac{\pi^2(1 + \cos \theta^H)}{8}, \quad (7.3)$$

а ширина (в радианах) ДН антенны равна:

- на уровне 0,5 по мощности:

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,18\lambda/a_p; \quad (7.4)$$

- на уровне нулевого излучения:

$$2\theta_0^H \approx 3\lambda / a_p. \quad (7.5)$$

Если излучающая поверхность S_p круглой формы, то при равномерном распределении поля по раскрыву антенны выражения для нормированной амплитудной ДН и ее ширины (в радианах) в главных плоскостях имеют вид:

$$\bar{F}(\theta) = \frac{J_1(0,5kd_p \sin \theta)}{0,5kd_p \sin \theta} (1 + \cos \theta); \quad (7.6)$$

$$2\theta_{0,5} = 1,02\lambda / d_p; \quad (7.7)$$

$$2\theta_0 = 2,44\lambda / d_p, \quad (7.8)$$

где d_p – диаметр раскрыва;

$J_1(0,5kd_p \sin \theta)$ – функция Бесселя первого порядка.

При спадающем до нуля параболическом законе распределении поля соответствующие выражения записываются так:

$$\bar{F}(\theta) = \frac{4J_2(0,5kd_p \sin \theta)}{(0,5kd_p \sin \theta)^2} (1 + \cos \theta); \quad (7.9)$$

$$2\theta_{0,5} = 1,27\lambda / d_p; \quad (7.10)$$

$$2\theta_0 = 3,26\lambda / d_p, \quad (7.11)$$

где $J_2(0,5kd_p \sin \theta)$ – функция Бесселя второго порядка.

КНД плоского излучающего раскрыва в направлении максимума излучения определяется по формуле

$$D_0 = 4\pi S_{эф} / \lambda^2, \quad (7.12)$$

где $S_{эф}$ – эффективная площадь раскрыва антенны, равная

$$S_{эф} = S_p \nu. \quad (7.13)$$

В (7.13) S_p – геометрическая площадь раскрыва; ν – КИП раскрыва, зависящий от амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве. При различных в плоскостях E и H амплитудно-фазовых распределениях, что обычно имеет место, КИП в этих плоскостях будет принимать разные значения. Значения ν в зависимости от вида синфазного амплитудного распределения поля в раскрывах прямоугольной и круглой излучающих апертур приведены в табл.П.5.

При несинфазном возбуждении излучающей апертуры ее направленные свойства ухудшаются.

Волноводные излучатели и рупорные антенны

Простейшим излучателем в диапазоне СВЧ является открытый конец прямоугольного или круглого волновода (рис.7.1). Так как электрические размеры поперечного сечения волноводов обычно меньше длины волны, то подобные антенны являются слабонаправленными.

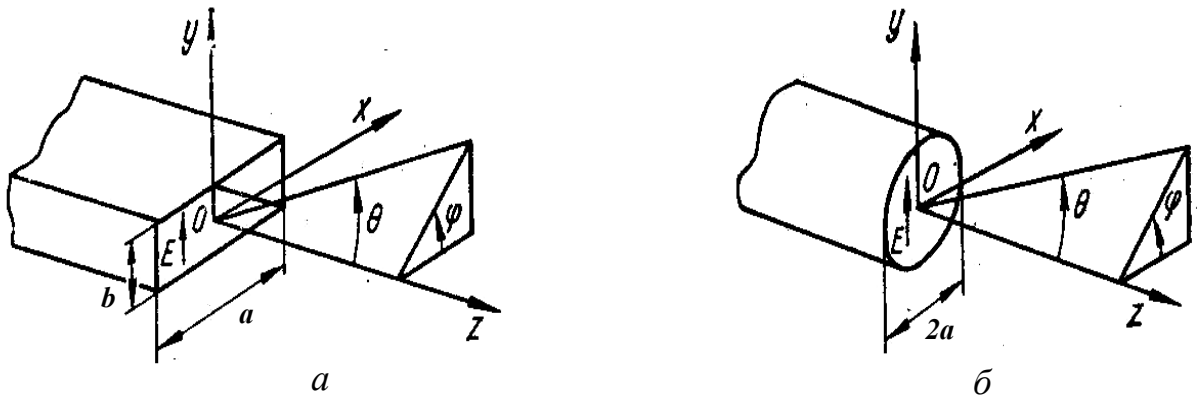


Рис. 7.1 – Волноводные излучатели:

a – на прямоугольном волноводе, $б$ – на круглом волноводе

Излучатель в виде открытого конца прямоугольного волновода, возбуждаемого волной H_{10} , характеризуют параметры:

- ширина ДН (в радианах) в плоскости H ($\varphi = 0$)

$$2\theta_{0,5}^H = 1,18\lambda / a, \quad (7.14)$$

- ширина ДН (в радианах) в плоскости E ($\varphi = \pi/2$)

$$2\theta_{0,5}^E = 0,89\lambda / b, \quad (7.15)$$

- КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 = 4\pi ab \nu / \lambda^2 \approx 10,2ab / \lambda^2, \quad (7.16)$$

где λ – длина волны; a, b – размеры сечения волновода;

ν – КИП раскрыва, равный 0,81.

Те же параметры для излучателя в виде открытого конца круглого волновода при возбуждении его волной H_{11} имеют вид:

$$2\theta_{0,5}^H = 1,62\lambda / 2a, \quad (7.17)$$

$$2\theta_{0,5}^E = 1,21\lambda / 2a, \quad (7.18)$$

$$D_0 = \nu(2\pi a / \lambda)^2 \approx 8,3(2a / \lambda)^2, \quad (7.19)$$

где $2a$ – внутренний диаметр волновода; ν – КИП раскрыва, равный 0,84.

Для получения большей направленности волноводный излучатель превращают в рупорную антенну. Наиболее распространенными являются секториальные, пирамидальные и конические рупоры с прямолинейными образующими (рис. 7.2).

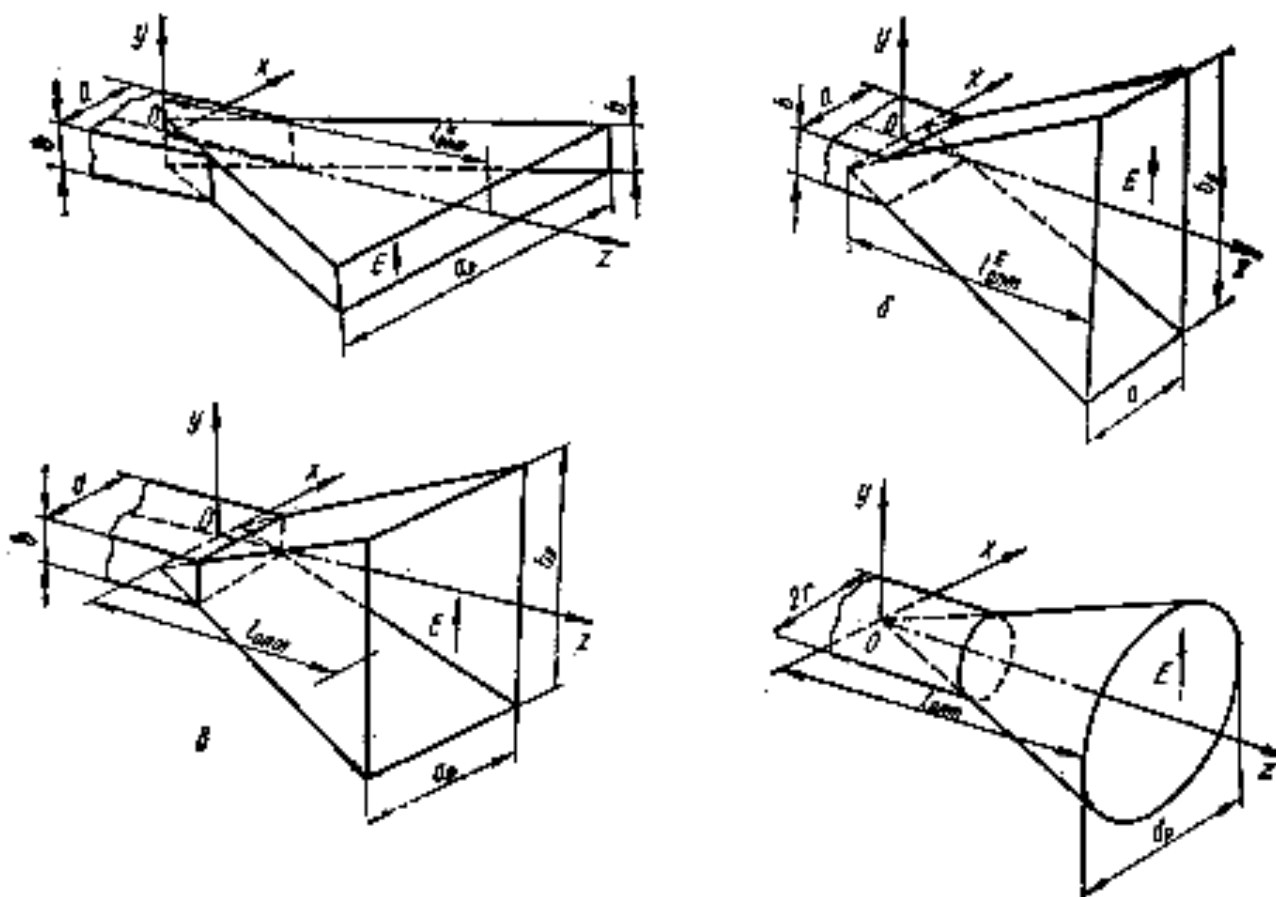


Рис. 7.2 – Типы рупорных антенн

Форма главного лепестка амплитудной ДН рупорной антенны зависит от угла раскрыва рупора. При постоянной длине рупора наибольшая направленность излучения у секториальных рупоров имеет место при углах раскрыва, которые соответствуют изменениям фазы (в радианах) на краях раскрыва: $\Phi = 3\pi/4$ в плоскости H и $\Phi = \pi/2$ в плоскости E . Рупоры с такими значениями максимальных изменений фазы на краях раскрыва получили название оптимальных.

Размеры оптимального H -плоскостного секториального рупора связаны между собой соотношением

$$L_{opt}^H = a_p^2 / 3\lambda, \quad (7.20)$$

где L_{opt}^H и a_p – оптимальная длина, т.е. расстояние от вершины до раскрыва рупора, и ширина раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) определяется по формулам:

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H = 1,4\lambda / a_p, \quad (7.21)$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E = 0,89\lambda / b. \quad (7.22)$$

Размеры оптимального E -плоскостного секториального рупора связаны между собой соотношением

$$L_{opt}^E = b_p^2 / 2\lambda, \quad (7.23)$$

где L_{opt}^E и b_p – оптимальная длина и ширина раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) определяется по формулам:

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H = 1,18\lambda / a, \quad (7.24)$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E = 0,93\lambda / b_p. \quad (7.25)$$

КНД в направлении максимума излучения оптимальных секториальных рупоров рассчитывается как

$$D_0 = 4\pi \nu S_p / \lambda^2 \cong 8S_p / \lambda^2, \quad (7.26)$$

где S_p – площадь раскрыва рупора; ν – КИП раскрыва рупора, равный 0,64.

Секториальные рупоры по сравнению с волноводными излучателями обеспечивают большую направленность только в одной из главных плоскостей. Для получения направленности в обеих плоскостях используются пирамидальные рупорные антенны. Пирамидальный рупор может быть остроконечным, если ребра рупора сходятся в одной точке ($L_{opt}^H = L_{opt}^E$), или клиновидным, если ребра не сходятся в одной точке ($L_{opt}^H \neq L_{opt}^E$). Размеры оптимального пирамидального клиновидного рупора рассчитываются по формулам (7.20) и (7.23), а остроконечного – по формулам

$$L_{opt} = a_p^2 / (3\lambda), \quad b_p = 0,8a_p. \quad (7.27)$$

Ширина ДН (в радианах) оптимального пирамидального рупора в главных плоскостях определяется по формулам:

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H = 1,4\lambda / a_p, \quad (7.28)$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E = 0,93\lambda / b_p. \quad (7.29)$$

КНД оптимального пирамидального рупора рассчитывается как

$$D_0 = 4\pi \nu a_p b_p / \lambda^2 \approx 6,2a_p b_p / \lambda^2, \quad (7.30)$$

где ν – КИП раскрыва, равный 0,49.

Нормированные амплитудные ДН пирамидальной рупорной антенны при возбуждении ее волной H_{10} приближенно можно рассчитать по формулам для прямоугольной синфазной апертуры с косинусоидальным в плоскости H и постоянным в плоскости E амплитудными распределениями:

$$\bar{F}(\theta^H) = \frac{\cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta^H\right) \frac{1 + \cos \theta^H}{2}}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin \theta^H\right)^2}; \quad (7.31)$$

$$\bar{F}(\theta^E) = \frac{\sin\left(\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta^E\right) \frac{1 + \cos \theta^E}{2}}{\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta^E}, \quad (7.32)$$

где θ^H , θ^E – углы, отсчитываемые от оси рупора в плоскостях H и E соответственно.

Размеры оптимального конического рупора, возбуждаемого волной основного типа круглого волновода, связаны между собой соотношением

$$L_{opt} = d_p^2 / (2,4\lambda) - 0,15\lambda, \quad (7.33)$$

где L_{opt} , d_p – оптимальная длина и диаметр раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) оптимального конического рупора составляет:

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,23\lambda / d_p; \quad (7.34)$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E \approx 1,05\lambda / d_p. \quad (7.35)$$

КНД в направлении максимума излучения такой антенны определяется по формуле

$$D_0 = \nu (\pi d_p / \lambda)^2 \approx 5(d_p / \lambda)^2, \quad (7.36)$$

где ν – КП раскрыва, равный 0,51.

Потери в рупорных антеннах малы и в расчетах обычно принимают КПД $\cong 1$.

Зеркальные антенны

Осесимметричные параболические зеркальные антенны часто возбуждаются полуволновым вибратором с рефлектором или пирамидальным рупором, фазовые центры которых должны находиться в фокусе параболоида (рис.7.3). Если облучатель создает сферическую волну, то за счет свойств параболоида сферическая волна преобразуется на выходе апертуры в плоскую, а относительно широкая ДН облучателя – в узкую ДН зеркальной антенны. Уравнение профиля осесимметричного параболического зеркала в декартовой системе координат определяется формулой

$$R(\psi) = \frac{2f_a}{1 + \cos \psi}, \quad (7.37)$$

где R – расстояние из фокуса до произвольной точки на поверхности зеркала,

ψ – угол между осью зеркала и направлением из фокуса в произвольную точку на поверхности зеркала,

f_a – фокусное расстояние (расстояние от вершины зеркала до фокуса).

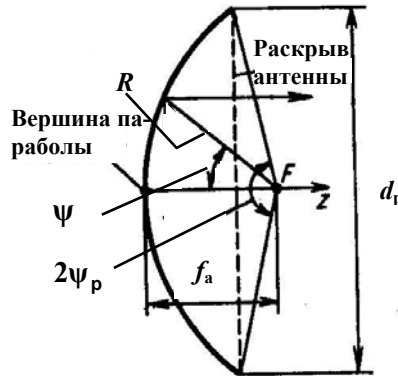


Рис. 7.3 – Профиль параболического зеркала

В направлении зеркала нормированная амплитудная ДН облучателя приближенно может быть описана выражением

$$\bar{F}_{obl}(\psi) \approx \cos^m \psi, \quad m \geq 1.$$

Для полуволнового вибратора с линейным рефлектором $m = 1$; для вибратора с дисковым рефлектором $m = 2$; для рупорных облучателей $m \geq 3$.

Оптимальное фокусное расстояние зеркала f_{opt} , обеспечивающее при заданном диаметре раскрыва $d_p = 2a_p$ и заданной ДН облучателя $\bar{F}_{obl}(\psi)$ наибольшее значение КНД антенны, зависит от диаметра раскрыва зеркала и ДН облучателя. Значения f_{opt} / d_p для разных m приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

m	f_{opt} / d_p
1	0,34 ... 0,40
2	0,40 ... 0,50
3	0,50 ... 0,625

Диаметр раскрыва d_p , полный угол раскрыва зеркала $2\psi_p$ и его фокусное расстояние f_a связаны между собой соотношением

$$d_p = 4f_a \operatorname{tg}(\psi_p / 2). \quad (7.38)$$

Параболическую антенну с осесимметричным зеркалом (параболоидом вращения) и облучателем линейной поляризации рассмотренных выше типов при оптимальном фокусном расстоянии характеризуют параметры:

- ширина ДН (в радианах) в плоскости H ($\varphi = 0$)

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,2\lambda / d_p, \quad (7.39)$$

- ширина ДН (в радианах) в плоскости E ($\varphi = \pi / 2$)

$$2\theta_{0,5}^E \approx 1,3\lambda / d_p, \quad (7.40)$$

- КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 \approx 5,5(d_p / \lambda)^2, \quad (7.41)$$

- КБВ в фидере облучателя

$$K_{БВ} = \frac{1 - \lambda D_{обл} / (4\pi f_a)}{1 + \lambda D_{обл} / (4\pi f_a)}, \quad (7.42)$$

где $D_{обл}$ – КНД облучателя.

С целью уменьшения доли энергии, проходящей мимо зеркала, и снижения уровня боковых лепестков диаграмму направленности облучателя выбирают такой, чтобы поле в раскрыве зеркала было спадающим к его краю. В этом случае синфазное нормированное амплитудное распределение поля в раскрыве осесимметричного зеркала часто аппроксимируется полиномом вида

$$\bar{I}(\bar{\rho}) = (1 - \delta) + \delta(1 - \bar{\rho}^2)^n, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (7.43)$$

где $(1 - \delta)$ – уровень поля на краю раскрыва относительно максимального значения в центре, равного единице при $\delta = 0$; $\bar{\rho}$ – нормированная на радиус зеркала a_p координата в раскрыве.

Тогда нормированная амплитудная ДН параболической зеркальной антенны приближенно может быть рассчитана по теореме о перемножении диаграмм направленности (5.40) как произведение ДН элемента Гюйгенса $\bar{F}_{эл}(\theta) = (1 + \cos\theta)/2$ и множителя направленности круглого синфазного раскрыва (апертуры)

$$\bar{f}_\Sigma(\theta) = \left[(1 - \delta)\Lambda_1(u) + \delta \frac{\Lambda_{n+1}(u)}{n+1} \right]. \quad (7.44)$$

Для остронаправленных антенн в пределах главного ДН можно считать $\bar{F}_{эл}(\theta) \approx 1$, т.е. ДН зеркальной антенны в основном определяется множителем направленности апертуры. В (7.44) специальная функция $\Lambda_n(u) = \frac{n! J_n(u)}{(u/2)^n}$ называется лямбда-функцией порядка n и выражается через функцию Бесселя

того же порядка; $u = ka_p \sin \theta$. В направлении максимума излучения ($\theta = 0$) имеем $\Lambda_1(0) = 1$; функции более высоких порядков при этом значении аргумента обращаются в нуль.

Поляризация излучения зеркальных антенн определяется поляризацией облучателя. При этом необходимо учитывать, что в случае круговой поляризации при отражении от металлического зеркала направление вращения плоскости поляризации меняется на противоположное. В случае линейной поляризации ее характер при отражении не меняется.

Допуски на отклонение профиля зеркала $\Delta\rho_1$ от параболы и на точность установки Δz (смещение в сторону зеркала) фазового центра облучателя в фокусе параболоида определяются по формулам

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{16(1 + \cos \psi)}; \quad \Delta z \leq \frac{\lambda}{16(1 - \cos \psi_p)}. \quad (7.45)$$

Формулы записаны для случая максимальных фазовых искажений поля в раскрыве зеркала, равных $\pi/8$.

Смещение Δx фазового центра облучателя из фокуса в направлении, перпендикулярном фокальной оси зеркала, вызывает отклонение максимума ДН антенны в сторону, противоположную смещению облучателя, на угол (в радианах)

$$\delta\theta \approx K_p \Delta x / f_a, \quad (7.46)$$

где K_p – коэффициент, зависящий от размеров и фокусирующих свойств антенны и определяемый по формуле

$$K_p \approx 1 - 0,5(0,25d_p / f_a)^2. \quad (7.47)$$

Для уменьшения реакции зеркала на облучатель вблизи вершины параболоида на его оси может устанавливаться плоский компенсирующий отражатель. Диаметр d_k этого отражателя и его минимальное удаление z_k от вершины параболоида (вдоль оси) определяются по формулам

$$d_k = \sqrt{4\lambda f_a / \pi}; \quad z_k = \lambda / 24. \quad (7.48)$$

Другим способом уменьшения реакции зеркала на облучатель является использование усеченного параболоида с облучателем, вынесенным из поля действия отраженных от параболоида волн. Такая антенна имеет ширину луча на уровне 0,5 по мощности (в радианах):

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,2\lambda / d_p; \quad (7.49)$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E \approx 1,2\lambda / a_p, \quad (7.50)$$

где d_p и a_p – размеры раскрыва зеркала в указанных плоскостях.

Для уменьшения массы и ветровой нагрузки, а также снижения уровня кроссполаризованного излучения поверхность зеркала перфорируют или выполняют решетчатой. Коэффициент прохождения (просачивания) электромагнитной энергии через перфорированную поверхность рассчитывается по формуле

$$T_{np} = \left(\frac{8 d_{om} \cdot S_{om}}{3 \lambda S_p} \right), \quad (7.51)$$

где d_{om} – диаметр отверстий; S_{om} – общая площадь всех отверстий в рефлекторе; S_p – площадь отражающей поверхности.

С целью уменьшения осевого размера, увеличения КИП и КПД, для снижения шумовой температуры параболической антенны, что очень важно при использовании последней в системах космической связи, к основному параболическому зеркалу 3 (рис.7.4) часто добавляют вспомогательное (малое) зеркало в виде гиперboloида вращения 2, один из фокусов которого совмещают с фокусом основного зеркала, а второй фокус совмещают с фазовым центром облучателя 1. Геометрические размеры такой двух-зеркальной антенны, называемой антенной Кассегрена, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} d_1 \approx 1,2\lambda / (2\theta_{0,5}); \quad f_1 \approx 0,35d_1; \quad d_2 \approx 0,15d_1; \\ f_2 \approx 0,5d_2 (0,35 + ctg\theta_2), \end{aligned} \right\} \quad (7.52)$$

где $2\theta_{0,5}$ – ширина луча антенны на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях (E или H); d_1 и f_1 – диаметр и фокусное расстояние большого зеркала; d_2 и f_2 – диаметр и фокусное расстояние малого зеркала; $2\theta_2$ – полный угол раскрытия малого зеркала.

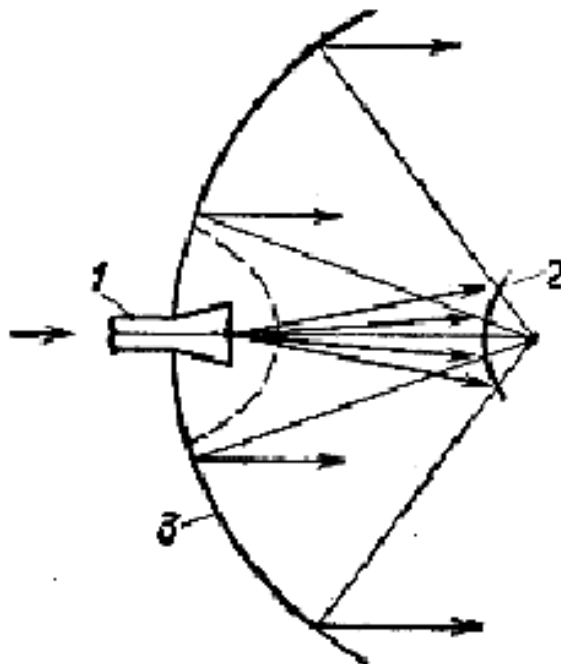


Рис. 7.4 – Двухзеркальная антенна Кассегрена:
1 – облучатель, 2 – малое зеркало, 3 – большое зеркало

Если высокая направленность зеркальной антенны требуется только в одной плоскости, то вместо параболоида вращения используется зеркало в виде параболического цилиндра. Параболический цилиндр обычно возбуждается линейным облучателем, расположенным вдоль фокальной оси цилиндра, и преобразует цилиндрический фронт волны облучателя в плоский. Такую антенну при синфазном и равномерном амплитудном распределении поля вдоль фокальной оси характеризуют параметры:

а) ширина ДН на уровне 0,5 по мощности (в радианах)

- в плоскости xOz

$$2\theta_{0,5}^{xOz} = 1,27\lambda / d_p; \quad (7.53)$$

- в плоскости yOz

$$2\theta_{0,5}^{yOz} = 0,89\lambda / a_p; \quad (7.54)$$

б) КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 \approx 10a_p d_p / \lambda^2; \quad (7.55)$$

в) КБВ в фидере облучателя

$$K_{БВ} = \frac{1 - \frac{D_{обл}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}}{1 + \frac{D_{обл}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}}. \quad (7.56)$$

Здесь d_p , a_p и f_a – диаметр раскрыва, длина образующей и фокусное расстояние цилиндрического зеркала; $D_{обл}$ – КНД облучателя.

Линзовые антенны

Линзовые антенны состоят из электромагнитной линзы и облучателя, фазовый центр которого совмещен с фокусом линзы. Чаще всего используются диэлектрическая или замедляющая (рис.7.5) и металлопластинчатая или ускоряющая (рис.7.6) линзы.

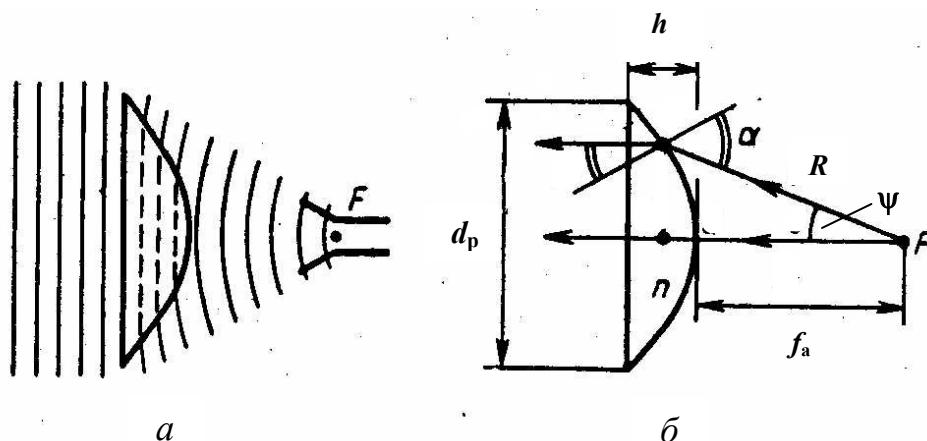


Рис. 7.5 – Диэлектрическая линза (а) и ход лучей в ней (б)

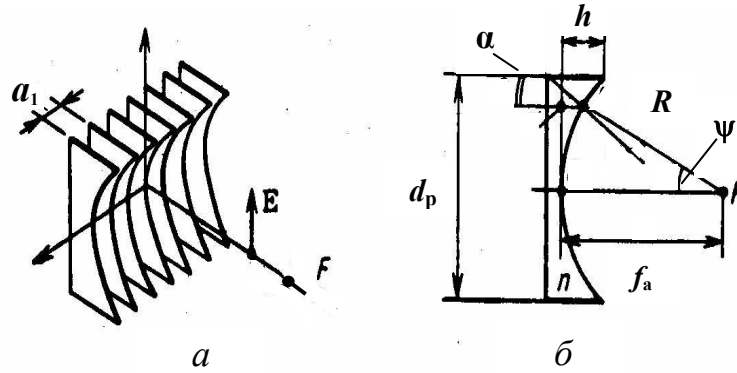


Рис. 7.6 – Металлопластинчатая линза (а) и ход лучей в ней (б)

Уравнение профиля замедляющей и ускоряющей линз в сферической системе координат определяется формулой

$$R(\theta) = \left(\frac{n-1}{n \cos \theta - 1} \right) f_a, \quad (7.57)$$

где R – расстояние из фокуса до произвольной точки на поверхности линзы,

θ – угол между осью линзы и направлением из фокуса в произвольную точку на поверхности линзы,

f_a – фокусное расстояние,

n – коэффициент преломления линзы.

Диэлектрические линзы имеют коэффициент преломления $n = \sqrt{\varepsilon} > 1$, где

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы. Толщина h гладкой диэлектрической линзы находится по формуле

$$h = \sqrt{\left(\frac{f_a}{n+1} \right)^2 + \frac{d_p^2}{4(n^2-1)}} - \frac{f_a}{n+1}, \quad (7.58)$$

где d_p – размер (прямоугольного) или диаметр (круглого) раскрыва линзы.

Металлопластинчатые линзы имеют коэффициент преломления

$$n = \sqrt{1 - (\lambda/2a_1)^2} < 1,$$

где a_1 – расстояние между параллельными пластинами линзы, λ – длина волны. В отличие от диэлектрических, коэффициент преломления металлопластинчатых линз зависит от частоты, поэтому они сравнительно узкополосны. Относительная ширина полосы рабочих частот гладкой металлопластинчатой линзы (в процентах) рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta f}{f_{cp}} = \frac{50 \lambda_{cp} n}{(1-n^2)h} \%, \quad (7.59)$$

где h – толщина гладкой металлопластинчатой линзы, определяемая по формуле

$$h = \frac{f_a}{n+1} - \sqrt{\left(\frac{f_a}{n+1}\right)^2 - \frac{d_p^2}{4(1-n^2)}}. \quad (7.60)$$

Если известны d_p и h , то полный угол раскрыва линзы $2\psi_p$ находится как

$$\left. \begin{aligned} \psi_p &= \arctg \left[\frac{d_p}{2(f_a + h)} \right] \quad n > 1; \\ \psi_p &= \arctg \left[\frac{d_p}{2(f_a - h)} \right] \quad n < 1. \end{aligned} \right\} \quad (7.61)$$

Для электромагнитных линз отношение f_a/d_p может находиться в пределах от 0,7 до 1,6; на практике часто выбирают $f_a \approx d_p$.

Чтобы уменьшить толщину линзы, сделать ее более широкополосной и технологичной, применяют зонированные (ступенчатые) линзы.

Размеры зонированной диэлектрической линзы определяются по формулам:

а) ширина ступеньки

$$z_1 = \frac{\lambda}{n-1}; \quad (7.62)$$

б) толщина

$$h = z_1 + z_2, \quad (7.63)$$

где z_2 – утолщение линзы, выбираемое из условия обеспечения ее механической прочности;

в) общее число зон

$$q = 1 + (f_q - f_a)(n-1)/\lambda, \quad (7.64)$$

где

$$f_q = \frac{nf_a / \sqrt{f_a^2 + (0,5d_p)^2}}{n-1} \sqrt{(0,5d_p)^2 + (f_a + h)^2}.$$

Размеры зонированной металлопластинчатой линзы определяются по формулам:

а) ширина ступеньки

$$z_1 = \frac{\lambda}{1-n}; \quad (7.65)$$

б) толщина

$$h = z_1 + z_2; \quad (7.66)$$

в) общее число зон

$$q = 1 + (f_q - f_a)(1-n)/\lambda, \quad (7.67)$$

где

$$f_q = \frac{\sqrt{f_a^2 + (0,5d_p)^2} - nf_a}{1 - n}.$$

Относительная ширина полосы рабочих частот зонированных линз (в процентах) рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta f}{f_{cp}} = \frac{50}{q + 1/n} \% . \quad (7.68)$$

При известном распределении возбуждающего поля в раскрыве осесимметричной линзы нормированные амплитудные ДН линзовых антенн приближенно могут быть рассчитаны по теореме о перемножении диаграмм направленности как произведение ДН элемента Гюйгенса $\bar{F}_{эл}(\theta)$ и множителя направленности круглого синфазного раскрыва (7.44). При этом в (7.44) необходимо λ заменить на $\lambda_0 = \lambda/\sqrt{\varepsilon}$. Для остронаправленных антенн $\bar{F}_{эл}(\theta) \approx 1$ и ДН антенны в основном определяется множителем направленности апертуры. С целью уменьшения доли энергии, проходящей мимо линзы, и снижения уровня боковых лепестков ДН облучателя выбирают такой, чтобы поле в раскрыве линзы было спадающим к ее краю.

В качестве облучателя антенны на сферической (цилиндрической) линзе может использоваться укороченный пирамидальный (секториальный) рупор, который создает сферическую (цилиндрическую) волну и имеет широкую ДН. Установив линзу в раскрыве так, чтобы ее фокус находился в фазовом центре рупора, можно сферическую или цилиндрическую волну, распространяющуюся в рупоре, преобразовать в плоскую и тем самым существенно уменьшить фазовые искажения в раскрыве рупора и увеличить его направленность. Нормированные амплитудные ДН таких антенн, называемых рупорно-линзовыми, в главных плоскостях могут быть рассчитаны по формулам (7.31), (7.32) для прямоугольной синфазной апертуры с заменой λ на $\lambda_0 = \lambda/\sqrt{\varepsilon}$.

КНД линзовых антенн в направлении максимума излучения определяется как

$$D_0 \approx 7,5S_p / \lambda^2, \quad (7.69)$$

где S_p – площадь раскрыва линзы.

КПД антенны с диэлектрической линзой определяется формулой

$$\eta = \exp\left(-\frac{2\pi hn}{\lambda} \operatorname{tg} \delta\right), \quad (7.70)$$

где $n = \sqrt{\varepsilon}$; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике; h – толщина линзы; λ – рабочая длина волны.

КУ линзовых антенн в направлении максимума излучения рассчитывают по формуле (5.16).

КБВ в фидере облучателя линзовой антенны равен: $1/n$ – у диэлектрических линз; n – у металлопластинчатых линз.

Допуски на отклонение профиля диэлектрической линзы $\Delta\rho_1$ от теоретической кривой и на точность установки Δz фазового центра облучателя в фокусе линзы определяются по формулам

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{16(n-1)}; \quad \Delta z \leq \lambda/2. \quad (7.71)$$

Для металлопластинчатой линзы аналогичные допуски рассчитываются по формулам

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{16(1-n)}; \quad \Delta z \leq \lambda/2. \quad (7.72)$$

Допуск на расстояние между пластинами Δa_1 определяется по формуле

$$\Delta a_1 \leq \frac{n\lambda a_1}{2d_p(1+n)}. \quad (7.73)$$

Отклонение максимума ДН линзовой антенны при смещении фазового центра облучателя из фокуса в направлении, перпендикулярном фокальной оси линзы, происходит так же, как и в случае параболической антенны, и определяется по формуле (7.46).

Поляризация излучения линзовых антенн, как и в случае зеркальных антенн, определяется поляризацией облучателя.

7.2 Примеры решения типовых задач

1. Максимальный КНД оптимального H -плоскостного секториального рупора равен $D_0 = 17,5$. Определить ширину ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в плоскости H , если ширина ДН на указанном уровне в плоскости E равна $2\theta_{0,5}^E = 1,15 \text{ рад}$.

Решение. Из формулы (7.26) следует $D_0 \cong 8a_p b / \lambda^2$. Один из размеров раскрыва рупора согласно формуле (7.22) равен $\frac{b}{\lambda} = \frac{0,89}{2\theta_{0,5}^E}$.

С учетом этого

$$D_0 = \frac{8a_p}{\lambda} \frac{b}{\lambda} = \frac{8a_p}{\lambda} \frac{0,89}{2\theta_{0,5}^E},$$

откуда

$$\frac{a_p}{\lambda} = \frac{2\theta_{0,5}^E D_0}{0,89 \cdot 8}.$$

Используя формулу (7.21), получаем

$$2\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} = 1,4 \cdot \frac{8 \cdot 0,89}{2\theta_{0,5}^E \cdot D_0} = 1,4 \cdot \frac{8 \cdot 0,89}{1,15 \cdot 17,5} = 0,495 \text{ рад}.$$

2. Определить размеры и параметры оптимального остроконечного пирамидального рупора, возбуждаемого на волне $\lambda = 7 \text{ см}$. Длина рупора $L_{opt} = 84 \text{ см}$.

Решение. Определим размеры раскрыва рупора. Пользуясь соотношениями (7.27), получаем

$$a_p = \sqrt{3L_{opt}\lambda} = \sqrt{3 \cdot 84 \cdot 7} = 42 \text{ см};$$

$$b_p = 0,8a_p = 0,8 \cdot 42 = 33,6 \text{ см}.$$

По формулам (7.28) – (7.30) находим:

$$2\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} = 1,4 \cdot \frac{7}{42} \approx 0,233 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^E = 0,93 \frac{\lambda}{b_p} = 0,93 \cdot \frac{7}{33,6} \approx 0,194 \text{ рад};$$

$$D_0 \approx 6,2 \frac{a_p b_p}{\lambda^2} = 6,2 \cdot \frac{42 \cdot 33,6}{7^2} \approx 178.$$

3. Определить размеры раскрыва оптимального пирамидального рупора, максимальный КНД которого $D_0 = 240$. Ширина ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях одинакова ($2\theta_{0,5}^H = 2\theta_{0,5}^E$), а длина волны равна $\lambda = 2 \text{ см}$.

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулами (7.28) – (7.30). Из формул (7.28) и (7.29) имеем:

$$1,4\lambda/a_p = 0,93\lambda/b_p, \text{ откуда } b_p = 0,665a_p.$$

Используя формулу (7.30), находим

$$a_p = \lambda \sqrt{\frac{D_0}{6,2 \cdot 0,665}} \cong 2 \sqrt{\frac{240}{4,12}} \cong 15,3 \text{ см};$$

$$b_p = 0,665a_p = 0,665 \cdot 15,3 \cong 10,2 \text{ см}.$$

4. Рассчитать пирамидальный рупор, который при возбуждении его прямоугольным волноводом МЭК-100 на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$ имеет КНД в направлении максимума излучения не менее 40.

Решение. Размеры рупора в горловине определяются внутренними размерами волновода $a = 22,85 \text{ мм}$; $b = 10,16 \text{ мм}$.

Площадь раскрыва рупора S_p определяем из формулы (7.30). Она равна $S_p = \frac{D_0 \lambda^2}{6,2} = \frac{40 \cdot 9}{6,2} \cong 58 \text{ см}^2$. Размеры сторон раскрыва рупора a_p и b_p находим, исходя из оптимального соотношения между ними (7.27):

$$b_p = 0,8a_p = \frac{0,8S_p}{b_p} = \frac{46,5}{b_p}, \text{ откуда } b_p = \sqrt{46,5} \cong 6,82 \text{ см}; a_p = \frac{6,82}{0,8} \cong 8,52 \text{ см}.$$

Длину рупора определяем из (7.27)

$$L_{omn} = \frac{a_p^2}{3\lambda} = \frac{(8,52)^2}{3 \cdot 3} \cong 8,07 \text{ см}.$$

Диаграммы направленности можно рассчитать по формулам (7.31) и (7.32). Их ширину оцениваем по формулам (7.28), (7.29):

$$2\theta_{0,5}^H = 1,4\lambda / a_p = 1,4 \cdot 3 / 8,52 \cong 0,493 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^E = 0,93\lambda / b_p = 0,93 \cdot 3 / 6,82 \cong 0,409 \text{ рад}.$$

5. Оптимальная коническая рупорная антенна имеет КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 320$. Длина рупора $L_{omn} = 1,2$ м. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН на уровне 0,5 по мощности в H - и E -плоскостях.

Решение. Из формулы (7.36) следует $\frac{d_p}{\lambda} = \sqrt{\frac{D_0}{5}}$.

На основании формул (7.34) и (7.35) имеем

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,23 \frac{\lambda}{d_p} = 1,23 \sqrt{\frac{5}{D_0}} = 1,23 \sqrt{\frac{5}{320}} \approx 0,154 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^E \approx 1,05 \frac{\lambda}{d_p} = 1,05 \sqrt{\frac{5}{D_0}} = 1,05 \sqrt{\frac{5}{320}} \approx 0,131 \text{ рад}.$$

Рабочую длину волны определяем, используя соотношение (7.33) и учитывая, что $d_p = \lambda \sqrt{D_0/5}$. Тогда $L_{omn} = \lambda (D_0/12 - 0,15)$, откуда

$$\lambda = \frac{L_{omn}}{\frac{D_0}{12} - 0,15} = \frac{1,2}{\frac{320}{12} - 0,15} \approx 4,53 \text{ см}.$$

6. Определить фокусное расстояние зеркальной антенны в виде параболоида вращения с углом раскрыва $\psi_p = 60^\circ$, максимальный КНД которой на волне длиной 3 см составляет $D_0 = 400$. Коэффициент использования поверхности раскрыва принять равным 0,6.

Решение. Геометрическую площадь S_p раскрыва зеркала определяем согласно (7.12) и (7.13): $S_p = \frac{D_0 \lambda^2}{4\pi\nu} = \frac{400 \cdot 9}{4\pi \cdot 0,6} = 477,7 \text{ см}^2$.

Диаметр параболического зеркала будет

$$d_p = \sqrt{\frac{4S_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 477,7}{3,14}} = \sqrt{608,5} = 24,7 \text{ см}.$$

Фокусное расстояние определяем, пользуясь формулой (7.38):

$$f_a = \frac{d_p \operatorname{ctg}(\Psi_p/2)}{4} = \frac{24,7 \operatorname{ctg} 30^\circ}{4} = \frac{24,7 \cdot 1,73}{4} = 10,7 \text{ см.}$$

7. Параболическая антенна с осесимметричным зеркалом диаметром $d_p = 4,5 \text{ м}$ возбуждается полуволновым вибратором с дисковым контррефлектором и работает на волне длиной $\lambda = 20 \text{ см}$. Определить оптимальное фокусное расстояние зеркала, угол его раскрытия и электрические параметры антенны.

Решение. Показатель степени в выражении для нормированной амплитудной ДН полуволнового вибратора с дисковым контррефлектором равен $m = 2$. Согласно табл. 7.1 при $m = 2$ имеем $f_{opt} / d_p = 0,4 \div 0,5$. Возьмем среднее значение. Тогда

$$f_{opt} = 0,45 d_p = 0,45 \cdot 4,5 = 2,025 \text{ м.}$$

Из соотношения (7.38) находим

$$\psi_p = 2 \operatorname{arctg} \frac{d_p}{4 f_{opt}} = 2 \operatorname{arctg} \frac{4,5}{4 \cdot 2,025} \approx 1,02 \text{ рад.}$$

По формулам (7.39) – (7.41) получаем

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1,2 \frac{\lambda}{d_p} = 1,2 \frac{20}{450} \approx 53 \text{ мрад}; \quad 2\theta_{0,5}^E \approx 1,3 \frac{\lambda}{d_p} = 1,3 \frac{20}{450} \approx 58 \text{ мрад.}$$

$$D_0 \approx 5,5 \left(\frac{d_p}{\lambda} \right)^2 = 5,5 \left(\frac{450}{20} \right)^2 \approx 2800.$$

8. Определить параметры антенны с зеркалом в виде параболического цилиндра и КБВ в фидере облучателя. Диаметр цилиндра $d_p = 20 \text{ см}$, длина образующей $a_p = 80 \text{ см}$, фокусное расстояние $f_a = 30 \text{ см}$. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$, КНД облучателя в осевом направлении $D_{obl} = 4$.

Решение. По формулам (7.53) – (7.56) находим:

$$2\theta_{0,5}^{xoz} \approx 1,27 \frac{\lambda}{d_p} = 1,27 \cdot \frac{3}{20} \approx 0,19 \text{ рад}; \quad 2\theta_{0,5}^{yoz} \approx 0,89 \frac{\lambda}{a_p} = 0,89 \frac{3}{80} \approx 0,033 \text{ рад.}$$

$$D_0 \approx 10 \frac{a_p d_p}{\lambda^2} = 10 \cdot \frac{80 \cdot 20}{3^2} \approx 1780;$$

$$K_{KB} = \frac{1 - \frac{D_{obl}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}}{1 + \frac{D_{obl}}{2\pi} \sqrt{\lambda/f_a}} = \frac{1 - \frac{4}{2\pi} \sqrt{3/30}}{1 + \frac{4}{2\pi} \sqrt{3/30}} = 0,67.$$

9. Определить толщину ускоряющей металлопластинчатой линзы, если расстояние между пластинами $a_1 = 5,5 \text{ см}$, длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$, фокусное расстояние и диаметр линзы составляют $f_a = 180 \text{ см}$ и $d_p = 180 \text{ см}$.

Решение. Показатель преломления линзы равен

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_1}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{10}{2 \cdot 5,5}\right)^2} = 0,42.$$

Толщину линзы находим по формуле (7.60):

$$\begin{aligned} h &= \frac{f_a}{1+n} - \sqrt{\left(\frac{f_a}{1+n}\right)^2 - \frac{d_p^2}{4(1-n^2)}} \\ &= \frac{180}{1,42} - \sqrt{\left(\frac{180}{1,42}\right)^2 - \frac{180^2}{4(1-0,174)}} = 64,9 \text{ см.} \end{aligned}$$

10. Определить КНД в направлении максимума излучения зонированной металлопластинчатой линзы, работающей на волне длиной $\lambda = 13$ см и имеющей параметры: $q = 3$; $\Delta f / f_{cp} = 10\%$; $d_p = f_a$. Рассчитать технические допуски на точность изготовления антенны.

Решение. Из формулы (7.68) находим коэффициент преломления линзы

$$n = \frac{1}{\frac{50}{\Delta f} f_{cp} - q} = \frac{1}{\frac{50}{10} - 3} = 0,5.$$

Поскольку $d_p = f_a$, то выражение для f_q , входящее в формулу (7.67), принимает значение

$$f_q = \frac{\sqrt{1,25 - n}}{1 - n} f_a = \frac{\sqrt{1,25 - 0,5}}{0,5} f_a \approx 1,24 f_a.$$

Тогда

$$q = 1 + \frac{(f_q - f_a)(1 - n)}{\lambda} = 1 + \frac{0,24 f_a (1 - n)}{\lambda},$$

откуда

$$f_a = d_p = \frac{(q-1)\lambda}{0,24(1-n)} = \frac{2 \cdot 13}{0,24 \cdot 0,5} \text{ см} \approx 2,16 \text{ м.}$$

Из формулы (7.69) получаем

$$D_0 \approx 7,5 \frac{S_p}{\lambda^2} = \frac{7,5 \pi d_p^2}{\lambda^2 \cdot 4} = \frac{7,5 \pi \cdot 216^2}{4 \cdot 13^2} \approx 1630.$$

Расстояние между пластинами линзы a_1 находим из формулы для коэффициента преломления $n = \sqrt{1 - (\lambda/2a_1)^2}$:

$$a_1 = \frac{\lambda}{2\sqrt{1-n^2}} = \frac{13}{2\sqrt{1-0,5^2}} = 7,5 \text{ см.}$$

Технические допуски на точность изготовления линзовой антенны рассчитываем по формулам (7.72) и (7.73):

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{16(1-n)} = \frac{13}{16 \cdot 0,5} \approx 1,63 \text{ см};$$

$$\Delta z \leq \frac{\lambda}{2} = \frac{13}{2} = 6,5 \text{ см};$$

$$\Delta a_1 \leq \frac{n\lambda a_1}{2d_p(1+n)} = \frac{0,5 \cdot 13 \cdot 7,5}{2 \cdot 216 \cdot 1,5} \approx 0,75 \text{ мм}.$$

11. Рассчитать H -плоскостной рупор с корректирующей металло-пластинчатой линзой внутри него. Антенна должна работать на волне длиной $\lambda = 8 \text{ см}$ и иметь КНД в осевом направлении $D_0 = 15$.

Решение. Размеры поперечного сечения рупора в месте соединения его с волноводом определяются стандартом волновода и составляют:

$$a = 0,71\lambda = 0,71 \cdot 8 = 5,8 \text{ см}; \quad b = 0,32\lambda = 0,32 \cdot 8 = 2,6 \text{ см}.$$

Благодаря корректирующей линзе поле в раскрыве рупора синфазно. Это позволяет считать, что КИП антенны в плоскости E , где амплитуда постоянна, равен $\nu_E = 1$, а в плоскости H , где амплитуда поля меняется по косинусоидальному закону, равен $\nu_H = 0,81$. Зная КИП, можно по формулам (7.12), (7.13) найти КНД в плоскостях E и H в направлении максимума ДН:

$$D_0^H = \frac{4\pi}{\lambda^2} \nu_H S_p = \frac{4\pi}{8^2} \cdot 0,81 S_p = 0,16 S_p,$$

$$D_0^E = \frac{4\pi}{\lambda^2} \nu_E S_p = \frac{4\pi}{8^2} \cdot S_p = 0,2 S_p.$$

Следовательно, средний КНД антенны равен

$$D_0 = \sqrt{D_0^H D_0^E} = \sqrt{0,2 \cdot 0,16 \cdot S_p^2} = 0,18 S_p.$$

Отсюда определим геометрическую площадь раскрыва антенны

$$S_p = \frac{D_0}{0,18} = \frac{15}{0,18} = 83 \text{ см}^2.$$

Найдем размеры раскрыва рупора a_p, b_p . Поскольку рупор секториальный, то $b_p = b = 2,6 \text{ см}$, а для a_p имеем

$$a_p = \frac{S_p}{b_p} = \frac{83}{2,6} = 31,9 \text{ см}.$$

Выберем оптимальное значение показателя преломления линзы, которое равно $n = 0,5$. Найдем угол раскрыва рупора ψ_p . Известно, что с уменьшением ψ_p линза облучается более равномерно, но при этом возрастает длина рупора. Поэтому возьмем промежуточное значение угла раскрыва $\psi = 25^\circ$.

Длину рупора L определим из простого геометрического соотношения типа $\sin \psi = \frac{a_p}{2L}$, откуда находим

$$L = \frac{a_p}{2 \sin \psi_p} = \frac{31,9}{2 \cdot 0,4226} = 37,7 \text{ см.}$$

По формуле (7.60) рассчитаем толщину линзы h , полагая, что выполняется соотношение $f_a = L = 37,7 \text{ см}$:

$$\begin{aligned} h &= \frac{f_a}{1+n} - \sqrt{\left(\frac{f_a}{1+n}\right)^2 - \frac{a_p^2}{4(1-n^2)}} = \\ &= \frac{37,7}{1+0,5} - \sqrt{\left(\frac{37,7}{1+0,5}\right)^2 - \frac{31,9^2}{4(1-0,5^2)}} = 8 \text{ см.} \end{aligned}$$

Найдем расстояние между пластинами линзы a_1 . Показатель преломления волноводной линзы равен $n = \sqrt{1 - (\lambda/2a_1)^2}$, поэтому

$$a_1 = \frac{\lambda}{2\sqrt{1-n^2}} = \frac{8}{2\sqrt{1-0,5^2}} = 4,7 \text{ см.}$$

Количество пластин m в линзе определим из соотношения

$$m = \frac{a_p}{a_1} + 1 = \frac{31,9}{4,7} + 1 = 7,8.$$

Округляем значения m до восьми и соответственно увеличиваем размер раскрыва до $a_p = 7a_1 = 7 \cdot 4,7 = 32,9 \text{ см}$, а длину рупора – до значения

$$L = \frac{a_p}{2 \sin \psi_p} = \frac{32,9}{2 \cdot 0,4226} = 38,9 \text{ см.}$$

Фокусное расстояние оставляем прежним. Форму пластин рассчитываем, исходя из уравнения профиля линзы (7.57).

Определим ширину ДН антенны. Считаем, что линза обеспечила синфазность поля в раскрыве антенны и не нарушила существенно распределение амплитуды поля. Поэтому ширина ДН может быть найдена по формулам (7.21) и (7.22):

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H \approx \left(1,4 \frac{\lambda}{a_p}\right) = \left(57,3 \cdot 1,4 \frac{8}{31,9}\right)^\circ = 20,1^\circ;$$

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E \approx \left(0,89 \frac{\lambda}{b_p}\right) = \left(57,3 \cdot 0,89 \frac{8}{2,6}\right)^\circ = 156,9^\circ.$$

7.3 Задачи для самостоятельного решения

7.1. Открытый конец прямоугольного волновода характеризуется параметрами: $2\theta_{0,5}^H = 2 \text{ рад}$, $D_0 = 1,5$. Определить относительные размеры поперечного сечения волновода.

Ответ: $a/\lambda = 0,59$; $b/\lambda = 0,25$.

7.2. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД излучателя в виде открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$. Внутренний диаметр волновода $2a = 2,4 \text{ см}$.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H = 2,16 \text{ рад}$; $2\theta_{0,5}^E = 1,61 \text{ рад}$; $D_0 \approx 4,67$.

7.3. Максимальный КНД открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$, равен $D_0 = 3$. Определить внутренний диаметр волновода.

Ответ: $2a \approx 6 \text{ см}$.

7.4. Определить размеры оптимального H -плоскостного секториально-го рупора, обеспечивающего в плоскости H на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$ ширину ДН на уровне 0,5 по мощности $2\theta_{0,5}^H = 0,35 \text{ рад}$, если передача энергии от генератора к рупору осуществляется по стандартному волноводу сечением $a \times b = 2,3 \times 1 \text{ см}^2$.

Ответ: $a_p = 12 \text{ см}$; $b = 1 \text{ см}$; $L_{opt}^H = 16 \text{ см}$.

7.5. Эффективная поверхность оптимальной H -плоскостной секториальной рупорной антенны составляет $S_{эф} = 200 \text{ см}^2$. Определить ширину ДН (в радианах) в H - и E -плоскостях и максимальный КНД антенны при работе на волне длиной $\lambda = 13 \text{ см}$, если один из размеров рупора в раскрытие равен $b_p = 3,4 \text{ см}$.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H = 0,198 \text{ рад}$; $2\theta_{0,5}^E = 3,4 \text{ рад}$; $D_0 \approx 14,8$.

7.6. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД оптимального остроконечного пирамидального рупора, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$. Длина рупора равна $L_{opt} = 1 \text{ м}$.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H = 0,256 \text{ рад}$; $2\theta_{0,5}^E = 0,212 \text{ рад}$; $D_0 \approx 149$.

7.7. Оптимальная пирамидальная рупорная антенна длиной $L_{opt} = 1,21 \text{ м}$ имеет КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 1000$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) в плоскостях H и E .

Ответ: $\lambda = 1,8 \text{ см}$; $2\theta_{0,5}^H = 98 \text{ мрад}$; $2\theta_{0,5}^E = 82 \text{ мрад}$.

7.8. Эффективная поверхность оптимальной пирамидальной рупорной антенны составляет $S_{эф} = 1 \text{ м}^2$. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД антенны при работе на частоте $f=3 \text{ ГГц}$.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H = 87,5 \text{ мрад}$; $2\theta_{0,5}^E = 73 \text{ мрад}$; $D_0 \approx 1270$.

7.9. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД оптимального конического рупора, работающего на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$. Длина рупора равна $L_{онм} = 6 \text{ см}$.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H \approx 0,568 \text{ рад}$; $2\theta_{0,5}^E \approx 0,476 \text{ рад}$; $D_0 \approx 24,2$.

7.10. Оптимальный конический рупор, работающий на частоте $f = 6 \text{ ГГц}$, имеет диаметр раскрыва $d_p = 20 \text{ см}$. Какого диаметра нужно взять раскрыв рупора и на сколько сантиметров при этом следует удлинить рупор, сохранив его оптимальным, чтобы увеличить КНД в два раза?

Ответ: $d_p \approx 28,2 \text{ см}$; удлинить на 33 см .

7.11. Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, ширина ДН которой в плоскости H составляет $2\theta_{0,5}^H = 17,5 \text{ мрад}$. Длина волны равна $\lambda = 3,2 \text{ см}$, а половина угла раскрыва зеркала $\psi_p = 0,86 \text{ рад}$.

Ответ: $d_p \approx 2,2 \text{ м}$; $f_a \approx 1,2 \text{ м}$.

7.12. Нормированная амплитуда поля в раскрыве параболоида вращения меняется по закону $\bar{I}(\bar{\rho}) = \left[1 - \left(\bar{\rho}/a_p \right)^2 \right]$. Определить максимальный КНД и ширину ДН антенны (в радианах) в плоскости E , если $a_p = 2 \text{ м}$, длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$. Записать расчетную формулу для нормированной ДН антенны.

Ответ: $D_0 = 12\,000$; $2\theta_{0,5}^E \approx 33 \text{ мрад}$; $\bar{F}(\theta) = 0,5\Lambda_2(125,8\sin\theta)$.

7.13. Определить полный угол раскрыва $2\psi_p$ параболоида вращения, имеющего фокусное расстояние 20 см и КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 1\,000$ на волне длиной 4 см .

Ответ: $2\psi_p = 71^\circ$.

7.14. Параболическая антенна с осесимметричным зеркалом диаметром $d_p = 1,8 \text{ м}$ возбуждается полуволновым вибратором с контррефлектором в виде стержня и работает на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$. Определить оптимальное фокусное расстояние, полный угол раскрыва зеркала $2\psi_p$, ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД антенны, считая, что $f_a = 0,4 d_p$.

Ответ: $f_a = 72 \text{ см}$; $2\psi_p \approx 2,24 \text{ рад}$; $2\theta_{0,5}^H \approx 67 \text{ мрад}$; $2\theta_{0,5}^E \approx 72 \text{ мрад}$; $D_0 \approx 1780$.

7.15. Определить КБВ в фидере рупорного облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом, относительный диаметр раскрыва ко-

торого $d_p/\lambda = 12$, а полный угол раскрыва $2\psi_p = 1,56 \text{ рад}$. КНД облучателя в направлении на зеркало равен $D_{\text{обл}} = 5,6$.

Ответ: $K_{\text{БВ}} = 0,885$.

7.16. Фазовый центр облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом, фокусное расстояние которого равно радиусу зеркала и составляет 50 см , смещен на 6 см в направлении, перпендикулярном фокальной оси. Определить угловое смещение (в радианах) максимума ДН антенны относительно оси зеркала.

Ответ: $\delta\theta = 0,105 \text{ рад}$.

7.17. Определить максимальный коэффициент усиления и КПД диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n = 1,6$; $\text{tg}\delta = 7 \cdot 10^{-4}$) и работающей на частоте $f = 15 \text{ ГГц}$, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы $d_p = f_a = 26 \text{ см}$.

Ответ: $G_0 \approx 945$; $\eta \approx 0,95$.

7.18. Определить толщину, угол раскрыва (в радианах) и максимальный КУ антенны в виде диэлектрической линзы, изготовленной из фторопласта ($n = 1,5$; $\text{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-4}$) и работающей на волне длиной $\lambda = 5 \text{ см}$, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы равны $d_p = f_a = 20 \lambda$. Рассчитать технические допуски на точность изготовления антенны.

Ответ: $h = 0,2 \text{ м}$; $2\theta_p \approx 0,792 \text{ рад}$; $G_0 \approx 2320$; $\Delta\rho \leq 5,2 \text{ мм}$; $\Delta z \leq 25 \text{ мм}$.

7.19. Определить толщину, фокусное расстояние и число пластин металлопластинчатой линзы, с помощью которой может быть сформирован плоский фазовый фронт в раскрыве оптимального H -плоскостного секториального рупора, имеющего размеры $a_p \times b = 73 \times 3,4 \text{ см}^2$. Длина рабочей волны $\lambda = 10 \text{ см}$, показатель преломления линзы $n = 0,55$. Определить максимальный КНД рупора с линзой и без нее, приближенно считая, что характер изменения амплитуды поля в раскрыве линзы такой же, как и в раскрыве рупора без линзы.

Ответ: $h = 10 \text{ см}$; $f_a = 188,5 \text{ см}$; $N = 13$; $D_0 = 25,3$ (с линзой);

$D_0 = 20$ (без линзы).

7.20. Зонированная металлопластинчатая линзовая антенна работает на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$. Расстояние между пластинами линзы $a_1 = 2 \text{ см}$. Определить максимальный КНД, ширину полосы рабочих частот и КБВ в фидере облучателя антенны при условии, что диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы: $d_p = f_a = 30 \lambda$.

Ответ: $D_0 \approx 5,3 \cdot 10^5$; $\Delta f / f_{\text{ср}} \approx 1,3\%$; $K_{\text{БВ}} = 0,6$.

8 АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

8.1 Основные теоретические сведения и расчетные соотношения

Система из двух вибраторов

Для улучшения направленных свойств к симметричному вибратору часто добавляют второй вибратор, располагаемый на некотором расстоянии от первого. Второй вибратор, как и первый, может быть либо активным и подсоединяться к генератору, либо пассивным и возбуждаться электромагнитным полем первого вибратора.

• Пусть два одинаковых вибратора лежат в одной плоскости, параллельны друг другу, являются активными, а питающие их токи связаны между собой соотношением

$$\dot{I}_2 / \dot{I}_1 = m \exp(i\Delta\Phi), \quad (8.1)$$

где m – отношение амплитуд токов; $\Delta\Phi = (\Phi_2 - \Phi_1)$ – сдвиг фазы тока I_2 относительно фазы тока I_1 (в радианах). Оси вибраторов параллельны оси z .

Наряду с прямоугольной, введем сферическую систему координат. Тогда нормированные амплитудные ДН двухвибраторной системы могут быть записаны в виде:

• в плоскости E

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sin \theta} \cdot \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin \theta)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}}; \quad (8.2)$$

• в плоскости H

$$\bar{F}(\varphi) = \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin \varphi)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}}, \quad (8.3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; l – длина плеча вибраторов; d – расстояние между ними; угол θ отсчитывается от оси z ; φ – полярный угол.

Сопротивление излучения системы, отнесенное к току в точках питания первого вибратора, рассчитывается по формуле

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + m^2 R_{\Sigma 2} + 2m R_{12} \cos \Delta\Phi, \quad (8.4)$$

где $R_{\Sigma 1}$ и $R_{\Sigma 2}$ – собственные активные сопротивления излучения вибраторов, отнесенные к максимумам токов; R_{12} – активная составляющая взаимного сопротивления вибраторов, отнесенная к максимуму тока и зависящая от расстояния d между вибраторами.

Кривые активной R_{12} и реактивной X_{12} составляющих взаимного сопротивления полуволновых вибраторов в зависимости от относительного расстояния d/λ между ними изображены на рис. 8.1.

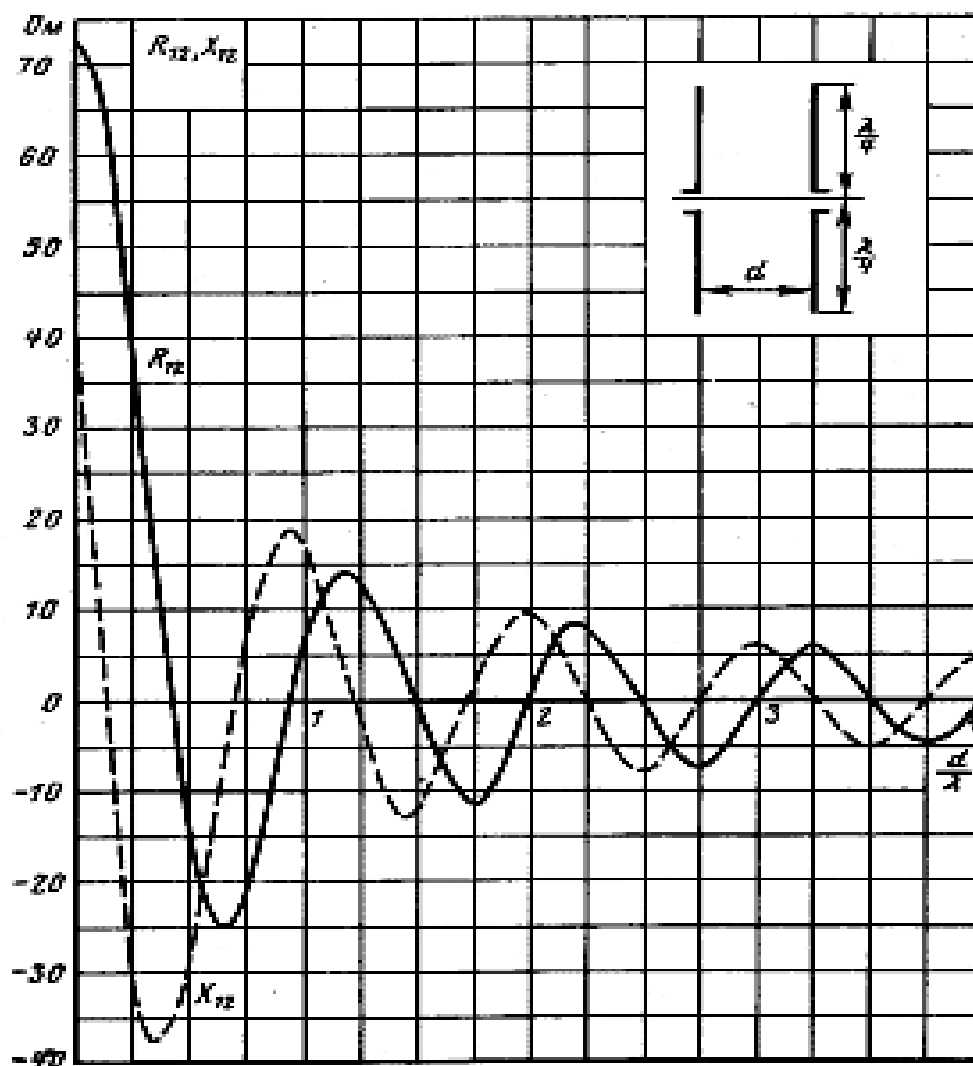


Рис. 8.1 – Взаимный импеданс полуволновых вибраторов

Результирующий КНД системы вибраторов находится как

$$D_C = \frac{D_0(1+m)^2 R_{\Sigma 1}}{R_{\Sigma C}}, \quad (8.5)$$

где D_0 – КНД одиночного вибратора, определяемый по формуле

$$D_0 = \frac{w}{\pi R_{\Sigma \Pi}} (1 - \cos kl)^2. \quad (8.6)$$

Для полуволнового вибратора $D_0 \cong 1,64$.

• Если второй вибратор является пассивным, то отношение амплитуд m и разность фаз $\Delta\Phi$ токов на входах вибраторов определяют из уравнения Кирхгофа, составленного для пассивного вибратора,

$$U_{ex2} = \dot{I}_2 Z_{22} + \dot{I}_1 Z_{12} = 0, \quad (8.7)$$

в котором \dot{I}_1, \dot{I}_2 – комплексные значения токов пассивного и активного вибраторов; Z_{22} – собственное комплексное сопротивление пассивного вибратора;

Z_{12} – взаимное комплексное сопротивление, вносимое активным вибратором в пассивный.

Из уравнения (8.7) имеем

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}} = -\frac{R_{12} + iX_{12}}{R_{22} + i(X_{22} + X_{H2})}, \quad (8.8)$$

где R_{12} и X_{12} – активная и реактивная составляющие взаимного сопротивления вибраторов; R_{22} и X_{22} – активная и реактивная составляющие собственного сопротивления пассивного вибратора; X_{H2} – реактивное сопротивление настройки, включаемое в пассивный вибратор и отнесенное к максимуму тока в нем.

В R_{22} входят активные потери в пассивном вибраторе. Если их не учитывать, то необходимо полагать $R_{22} = R_{\Sigma 2}$.

Из (8.8) получаем

$$m = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \sqrt{\frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{22}^2 + (X_{22} + X_{H2})^2}}, \quad (8.9)$$

$$\Delta\Phi = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{22} + X_{H2}}{R_{22}}. \quad (8.10)$$

Нормированные амплитудные ДН и КНД такой системы также рассчитываются по формулам (8.2), (8.3) и (8.5), но сопротивление излучения находится как

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi), \quad (8.11)$$

где $R_{\Sigma 1}$ – собственное сопротивление излучения активного вибратора, отнесенное к максимуму тока.

Входное сопротивление активного вибратора в системе может быть записано в виде

$$Z_{ex} = R_{ex} + iX_{ex} = Z_{11} + mZ_{12}e^{i\Delta\Phi}. \quad (8.12)$$

После преобразования (8.12) получим

$$R_{ex} = R_{11} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi), \quad (8.13)$$

$$X_{ex} = X_{11} + m(X_{12} \cos \Delta\Phi + R_{12} \sin \Delta\Phi). \quad (8.14)$$

Линейные эквидистантные решетки

Нормированная амплитудная ДН или множитель направленности линейной эквидистантной ($d = \text{const}$) решетки N изотропных излучателей при постоянном амплитудном и линейном фазовом распределении возбуждения типа $I(z) = I_0 \exp[-i(N-1)\Delta\Phi]$ имеет вид

$$\bar{f}_{\Sigma}(\theta) = \frac{\sin[0,5N(kd \cos \theta - \Delta\Phi)]}{N \sin[0,5(kd \cos \theta - \Delta\Phi)]}, \quad (8.15)$$

где $\Delta\Phi$ – разность фаз между токами соседних излучателей,

θ – угол в радианах между осью решетки и направлением в точку наблюдения.

Направления главных максимумов ДН и боковых лепестков (в радианах) определяются по формулам

$$\theta_{2l} = \arccos \frac{2q\pi + \Delta\Phi}{kd}, \quad q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad (8.16)$$

$$\theta_q = \arccos \frac{2(q+1)\pi + N\Delta\Phi}{Nkd}, \quad q = \pm 1, \pm 2, \dots. \quad (8.17)$$

Уровень боковых лепестков по отношению к главному находится как

$$F_q(\theta) \approx \frac{1}{N \sin(q\pi/N + 0,5\pi N)}, \quad (8.18)$$

где q – номер бокового лепестка.

Практический интерес представляют равноамплитудные линейные эквидистантные решетки с поперечным или продольным расположением симметричных вибраторов. Чтобы сформировать однонаправленную ДН и вдвое увеличить КНД, к решетке продольных вибраторов добавляют такое же количество вибраторов, играющих роль рефлекторов, которые устанавливают на расстоянии $\lambda/4$ от вибраторов. Множитель направленности системы излучатель – рефлектор при настроенном рефлекторе в этом случае имеет вид

$$\bar{f}_\Sigma(\theta) = \cos[0,25\pi(1 - \sin \theta)], \quad (8.19)$$

а если рефлектор выполнен плоским в виде проволочной сетки или сплошного металлического листа, то

$$\bar{f}_\Sigma(\theta) = \sin(0,5\pi \sin \theta). \quad (8.20)$$

Сопrotивление излучения многовибраторной антенной решетки рассчитывается как

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2} + \dots + R_{\Sigma i} + \dots + R_{\Sigma N}, \quad (8.21)$$

где

$$R_{\Sigma i} = R_{\Sigma i1} + R_{\Sigma i2} + \dots + R_{\Sigma ii} + \dots + R_{\Sigma iN}. \quad (8.22)$$

В (8.22) $R_{\Sigma i1}, \dots, R_{\Sigma iN}$ – вносимые сопротивления излучения, обусловленные влиянием каждого из остальных вибраторов решетки на i -й; $R_{\Sigma ii}$ – сопротивление излучения уединенного i -го вибратора решетки, отнесенное к максимуму тока. Значение вносимого сопротивления зависит от расстояния между вибраторами d , их осевого смещения h и приведены в табл.8.1.

Пользуясь значениями вносимых сопротивлений излучения, можно находить сопротивления излучения не только синфазных вибраторов, но и противофазных. В последнем случае знаки у значений сопротивлений, указанных в табл. 8.1, нужно изменить на противоположные.

Таблица 8.1

d/λ	$R_{\Sigma_{вн}}, Ом$			
	$h/\lambda = 0$	$h/\lambda = 0,5$	$h/\lambda = 1$	$h/\lambda = 1,5$
0	+73,1	+26,4	-4,1	+1,7
0,1	+67,3	+23,5	-4,1	+1,7
0,2	+51,4	+15,7	-4,0	+1,7
0,3	+29,3	+5,2	-3,5	+1,6
0,4	+6,2	-4,9	-2,4	+1,4
0,5	-12,5	-11,9	-0,8	+1,1
0,6	-23,3	-14,1	+1,5	+0,5
0,7	-24,9	-11,3	+3,6	-0,4
0,8	-18,5	-4,9	+5,1	-1,3
0,9	-7,5	+2,8	+5,3	-2,1
1,0	+4,0	+9,0	+4,1	-2,7
1,1	+12,4	+12,0	+1,5	-2,8
1,2	+15,2	+10,8	-1,6	-2,2
1,3	+12,6	+6,3	-4,5	-1,1
1,4	+6,0	-0,1	-6,3	+0,4
1,5	-1,8	-5,8	-6,2	+2,1
1,6	-8,1	-9,2	-4,3	+3,4
1,7	-10,9	-9,3	-1,2	+4,0
1,8	-9,4	-6,1	+2,4	+3,6
1,9	-4,8	-1,2	+5,1	+2,2
2,0	+1,1	+3,9	+6,3	-0,1
2,1	+6,1	+7,2	+5,4	-1,9
2,2	+8,4	+7,8	+2,9	-3,6
2,3	+7,6	+5,6	-0,5	-4,3
2,4	+4,0	+1,6	-3,6	-3,8
2,5	-0,7	-2,2	-5,4	-2,2

Директорные и логопериодические антенны

Директорная антенна представляет собой дискретную систему N расположенных в одной плоскости параллельных симметричных вибраторов. Размеры вибраторов обычно близки к полуволновым. Один из вибраторов, имеющий размер $2l = \lambda/2$, подсоединяется к фидерной линии и называется активным, а другие не подсоединяются к фидерной линии и называются пассивными. Пассивный вибратор, имеющий длину $2l > \lambda/2$ и располагаемый по одну сторону от активного, играет роль рефлектора. Остальные вибраторы

Если не решать систему (8.23), то для приближенной оценки характеристик излучения директорной антенны полагают $d_n = d_{cp}$, $2l_n = \lambda/2$, $I_n = I_0 \exp[-i(n-1)\Delta\Phi]$, $\Delta\Phi = \pi/2$. Тогда нормированные амплитудные ДН антенны можно рассчитать по формулам:

- в плоскости ($\varphi = 0$)

$$\bar{F}(\theta^E) = \frac{\cos(0,5\pi \sin \theta^E)}{\cos \theta^E} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos \theta^E) \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos \theta^E) \right]}; \quad (8.26)$$

- в плоскости ($\varphi = \pi/2$)

$$\bar{F}(\theta^H) = \frac{\sin \left[\frac{N\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos \theta^H) \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d_{cp}}{\lambda} (1 - \cos \theta^H) \right]}. \quad (8.27)$$

Ширина ДН антенны (в радианах) определяется по формуле:

- в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E \approx \frac{3,5}{N-1}, \quad (8.28)$$

- в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H \approx \frac{3,8}{N-1}. \quad (8.29)$$

КНД в направлении максимума ДН и эффективная площадь директорной антенны рассчитываются по формулам

$$D_0 \approx 5[1 + d_{cp}(N-1)/\lambda], \quad (8.30)$$

$$S_{эф} = D_0 \lambda^2 / (4\pi). \quad (8.31)$$

Логопериодическая антенна (рис. 8.2), как и директорная, также используется в радиосвязи и телевидении на метровых и дециметровых волнах. Ее отличительной особенностью является то, что она может работать в весьма широком диапазоне частот: наибольшая длина волны определяется максимально допустимыми поперечными размерами антенны ($2l_N \approx \lambda_{\max}/2$), а наименьшая длина волны ограничивается точностью выполнения самого короткого вибратора ($2l_1 \approx \lambda_{\min}/2$).

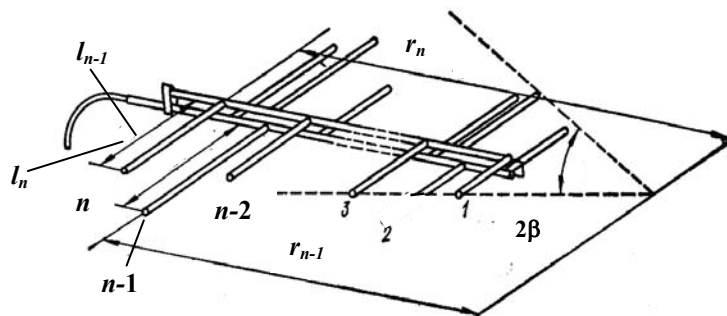


Рис. 8.2 – Логопериодическая антенна

Коэффициент подобия (безразмерный период структуры) τ связывает длины соседних вибраторов $2l_{n-1}$ и $2l_n$, а также расстояния этих вибраторов r_{n-1} и r_n от вершины угла раскрыва полотна антенны 2β соотношением

$$\tau = 2l_{n-1} / (2l_n) = r_{n-1} / r_n. \quad (8.32)$$

Зависимости ширины ДН антенны на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях (H и E) от угла 2β для антенн с разными значениями τ показаны на рис. 8.3.

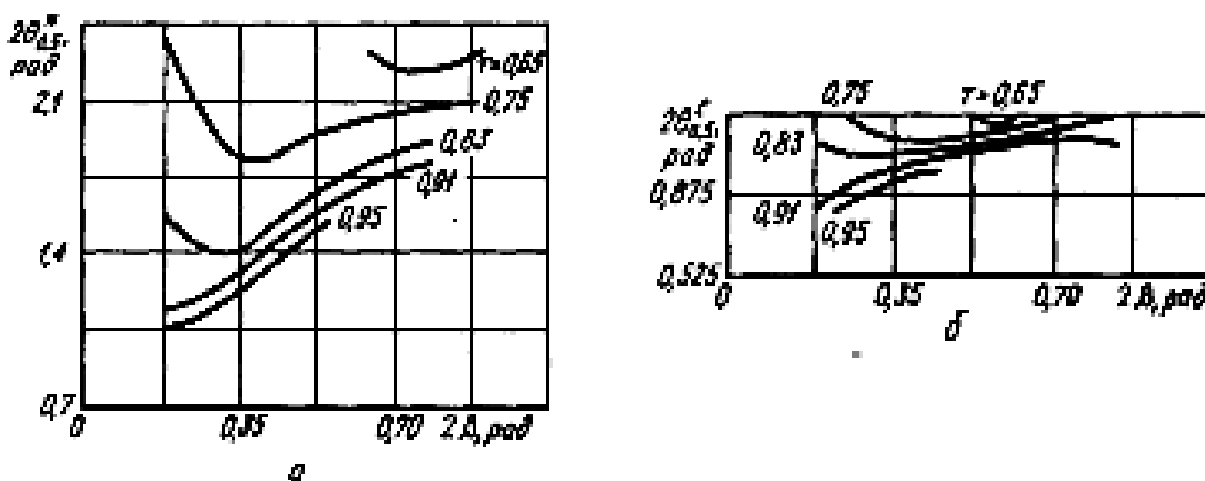


Рис.8.3 – Зависимость ширины ДН логопериодической антенны от угла раскрыва

Волноводные щелевые антенные решетки

Подобные антенны представляют собой систему щелей, прорезанных в стенках волновода. Чаще всего используются полуволновые резонансные щели на широкой или узкой стенках прямоугольного волновода, в котором распространяется волна основного типа H_{10} . Возбуждение щели происходит за счет того, что ее пересекают электрические токи, текущие по внутренней поверхности волновода. Волноводные щелевые антенные решетки (ВЩАР) могут быть двух типов – резонансные (режим стоячих волн в волноводе) и нерезонансные (режим бегущих волн в волноводе).

• Резонансные ВЦАР выполняют на основе закороченных на одном конце волноводов (см. рис.8.4). Если щели поперечные и расстояние между ними равно длине волны в волноводе λ_g , то решетка будет на синфазно связанных с полем волновода щелях (рис. 8.4, а). На рис. 8.4, б изображена

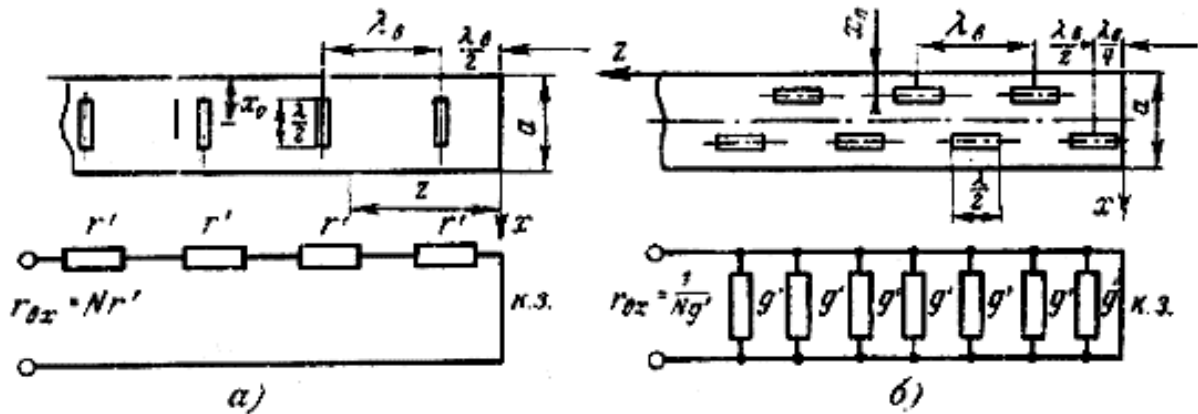


Рис. 8.4 – Резонансные волноводные щелевые решетки на синфазно связанных (а), переменноразно связанных (б) щелях и их схемы замещения

резонансная ВЦАР на переменноразно связанных с полем волновода продольных щелях. В обоих случаях возбуждение всех щелей синфазное, так как во втором случае следует учесть дополнительный фазовый сдвиг на π за счет размещения щелей по разные стороны от осевой линии. Поэтому у обеих решеток направление максимума излучения нормально к широкой стенке волновода.

Нормированная амплитудная ДН синфазной антенны с поперечными щелями (рис. 8.4, а) в продольной плоскости описывается выражением

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\sin(0,5Nk\lambda_g \sin \theta)}{N \sin(0,5k\lambda_g \sin \theta)}, \quad (8.33)$$

где θ – угол между нормалью к широкой стенке волновода и направлением в точку наблюдения; N – число щелей; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны в свободном пространстве; λ_g – длина волны в волноводе, рассчитываемая по формуле

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda/(2a)]^2}}; \quad (8.34)$$

где a – размер широкой стенки волновода.

Нормированная амплитудная ДН синфазной антенны с продольными щелями (рис. 8.4, б) в продольной плоскости определяется произведением нормированной амплитудной ДН одиночной щели $\bar{F}_1(\theta)$ на нормированный множитель системы (решетки) $\bar{f}_\Sigma(\theta)$, т.е.

$$\bar{F}(\theta) = \bar{F}_1(\theta) \bar{f}_\Sigma(\theta) = \frac{\cos(0,5\pi \sin \theta)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin(0,25Nk\lambda_g \sin \theta)}{N \sin(0,25k\lambda_g \sin \theta)}. \quad (8.35)$$

Щель нарушает режим бегущих волн в волноводе, поскольку приводит к отражению от нее электромагнитной энергии. На эквивалентной схеме волновода щель можно представить в виде некоторого сопротивления, включенного в линию параллельно или последовательно (в зависимости от положения щели). Продольная щель эквивалентна параллельно включенному сопротивлению, поперечная – включенному последовательно. При расчете согласования щелевых антенн обычно пользуются понятиями последовательного сопротивления и параллельной проводимости.

Эквивалентное последовательно включенное сопротивление поперечной полуволновой щели (рис. 8.4, а), нормированное на волновое сопротивление волновода с волной H_{10} , определяется как

$$\bar{R}_1 \cong 0,523 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda} \right)^3 \frac{\lambda^2}{ab} \cos^2 \left(\frac{\pi\lambda}{4a} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x_0}{a} \right), \quad (8.36)$$

где x_0 – смещение центра щели относительно узкой стенки волновода.

Эквивалентная параллельно включенная проводимость продольной полуволновой щели (рис. 8.4, б), нормированная (умноженная) на волновое сопротивление волновода с волной H_{10} , рассчитывается по формуле

$$\bar{G}_1 \cong 2,09 \frac{a\lambda_g}{b\lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi\lambda}{2\lambda_g} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi x_0}{a} \right), \quad (8.37)$$

где x_0 – смещение центра щели относительно узкой стенки волновода.

Нормированные входные сопротивления и проводимости этих решеток соответственно равны

$$\bar{R}_{ex} = N\bar{R}_1, \quad \bar{G}_{ex} = N\bar{G}_1. \quad (8.38)$$

На рис. 8.4 они обозначены r' и g' . Для того чтобы в возбуждающем волноводе установился режим бегущих волн, должно выполняться условие

$$\bar{R}_{ex} = \bar{G}_{ex} = 1. \quad (8.39)$$

Его выполнения на резонансной частоте добиваются посредством подбора требуемых значений \bar{R}_1 и \bar{G}_1 по формулам (8.36), (8.37).

- Полоса пропускания у синфазных резонансных ВЩАР, как и у всех резонансных систем, составляет несколько процентов. Чтобы увеличить диапазонность, применяют несинфазные (нерезонансные) ВЩАР бегущей волны. Нерезонансные ВЩАР от резонансных отличаются тем, что волновод нагружается на свободном конце на согласованную (поглощающую) нагрузку. В отсутствие щелей в волноводе устанавливается режим бегущей волны основного типа H_{10} . Щели располагаются на таком расстоянии d одна от другой, которое обеспечивает фазовый набег между двумя соседними щелями, соответствующий бегущей волне, т.е.

$\Delta\Phi = 2\pi d / \lambda_g$ для синфазно связанных щелей,

$\Delta\Phi = 2\pi d / \lambda_g \pm \pi$ для переменноразно связанных щелей.

При небольшом расфазировании щелей нормированные амплитудные ДН таких антенн рассчитываются по формулам (8.33) и (8.35), а величина смещения главного максимума ДН относительно нормали к широкой стенке волновода (в радианах) определяется с использованием соотношения

$$\delta\theta = \arcsin(\lambda / \lambda_g - q\lambda / d), \quad (8.40)$$

где $q = 0$ – для синфазно связанных с полем волновода щелей (рис. 8.2, а);

$q = 0,5$ – для переменноразно связанных с волноводом щелей (рис. 8.2, б).

КНД волноводно-щелевых антенных решеток оценивается по формуле

$$D_0 \approx 3,2N. \quad (8.41)$$

Плоские решетки

Для получения узких ДН в двух взаимно ортогональных плоскостях используют двумерные (плоские) решетки излучателей, в которых излучатели располагаются в узлах прямоугольной или треугольной сеток (рис.8.5). При

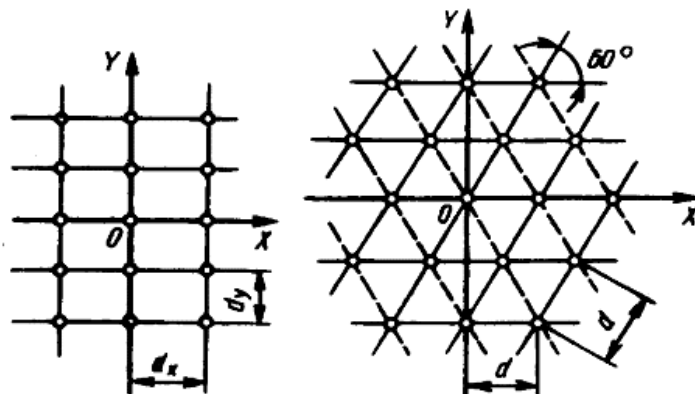


Рис. 8.5 – Схемы размещения элементов в плоской ФАР

расположении изотропных излучателей в узлах прямоугольной сетки условие полного отсутствия побочных главных максимумов при отклонении луча антенны на угол θ_{\max} от нормали (ось Oz) к ее поверхности будет выполнено, если шаг решетки по осям Ox и Oy удовлетворяет неравенствам

$$d_x < \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{x\max}}; \quad d_y < \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{y\max}}, \quad (8.42)$$

где $\theta_{x\max}$ и $\theta_{y\max}$ – максимальные углы сканирования в плоскостях zOx и zOy соответственно.

Аналогичное условие при расположении изотропных излучателей в узлах треугольной сетки записывается как

$$d < \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}}. \quad (8.43)$$

Нормированная амплитудная ДН плоской эквидистантной решетки изотропных излучателей (множитель решетки) при равноамплитудном и линейном фазовом распределении возбуждения определяется по правилу (теореме) перемножения диаграмм (5.40):

$$\bar{f}(\theta) = \frac{\sin[0,5N_x(kd_x \sin \theta_x - \psi_{1x})]}{N_x \sin[0,5(kd_x \sin \theta_x - \psi_{1x})]} \cdot \frac{\sin[0,5N_y(kd_y \sin \theta_y - \psi_{1y})]}{N_y \sin[0,5(kd_y \sin \theta_y - \psi_{1y})]}, \quad (8.44)$$

где N_x, N_y – количество излучателей вдоль осей Ox и Oy соответственно; ψ_{1x} – разность фаз между токами соседних излучателей вдоль оси Ox ; ψ_{1y} – разность фаз между токами соседних излучателей вдоль оси Oy .

Нормированные амплитудные ДН плоской эквидистантной решетки направленных излучателей в виде горизонтальных симметричных вибраторов при равноамплитудном возбуждении рассчитываются по формулам:

- в горизонтальной плоскости (плоскость E)

$$\bar{F}(\theta^E) = \frac{\cos(kl \sin \theta^E) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos \theta^E} \cdot \frac{\sin[0,5N_y(kd_y \sin \theta^E - \psi_{1y})]}{N_y \sin[0,5(kd_y \sin \theta^E - \psi_{1y})]}, \quad (8.45)$$

- в вертикальной плоскости (плоскость H)

$$\bar{F}(\theta^H) = \frac{\sin[0,5N_x(kd_x \sin \theta^H - \psi_{1x})]}{N_x \sin[0,5(kd_x \sin \theta^H - \psi_{1x})]}. \quad (8.46)$$

При наличии рефлектора выражения (8.45) и (8.46) следует дополнить множителем пары излучатель – рефлектор (8.19) или (8.20).

Ширина ДН синфазной ($\psi_{1x} = \psi_{1y} = 0$) равноамплитудной эквидистантной решетки симметричных вибраторов на уровне 0,5 по мощности и на уровне нулевого излучения в соответствующих плоскостях определяются по формулам (6.59) и (6.60) для ЛНС, в которых $\theta = \pi/2$. Направления боковых лепестков и их уровень рассчитываются по формулам (8.17) и (8.18), в которых $\Delta\Phi = 0$. Максимальный КНД находится как

$$D_0 = \frac{120}{R_{\Sigma C}} (N_x N_y)^2 (1 - \cos kl)^2, \quad (8.47)$$

где $R_{\Sigma C}$ – сопротивление излучения антенной решетки, определяемое по формуле (8.21).

8.2 Примеры решения типовых задач

1. Найти соотношения между амплитудами и фазами токов в системе, состоящей из расположенных в одной плоскости параллельных полуволновых активного (1) и пассивного (2) вибраторов, если $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 2} = 73 \text{ Ом}$;

$X_{\Sigma 2} = 40 \text{ Ом}; X_{H2} = 0; d = 0,15\lambda$. Потери не учитывать. Определить также сопротивление излучения антенны.

Решение. Из графиков рис. 8.1 находим величину активной и реактивной составляющих взаимного сопротивления вибраторов: $R_{12} \approx 60 \text{ Ом}$, $X_{12} \approx -6 \text{ Ом}$. Отношение амплитуд и сдвиг фаз токов в вибраторах определяем по формулам (8.9), (8.10)

$$m \approx \sqrt{\frac{60^2 + 6^2}{73^2 + 40^2}} \approx 0,73; \quad \Delta\Phi \approx \left(\pi + \operatorname{arctg} \frac{-6}{60} - \operatorname{arctg} \frac{40}{73} \right) \approx 2,5(\text{рад}).$$

По формуле (8.11) получаем

$$R_{\Sigma C} \approx [73 + 0,73(60 \cos 2,5 + 6 \sin 2,5)] \approx 40 \text{ (Ом)}.$$

2. Определить сопротивление излучения системы, состоящей из активного полуволнового вибратора 1 и пассивного полуволнового рефлектора 2. Рефлектор настроен с помощью реактивного сопротивления X_{H2} так, что его ток опережает по фазе ток активного вибратора на угол $\pi/2$.

Решение. Оптимальное расстояние между активным вибратором и пассивным рефлектором $0,2 \lambda \leq d \leq 0,25 \lambda$. Принимаем $d = 0,225 \lambda$. Определяем с помощью графика рис. 8.1 активную и реактивную составляющие взаимного сопротивления вибратора и рефлектора:

$$R_{12} \approx 45 \text{ Ом}, \quad X_{12} \approx -24 \text{ Ом}.$$

В соответствии с условием задачи производим настройку рефлектора таким образом, чтобы его ток опережал по фазе ток активного вибратора на угол $\Delta\Phi = \pi/2$. Величина фазового сдвига определяется формулой (8.10). Подставив в формулу $\Delta\Phi = \pi/2$ и известные из теории полуволнового вибратора значения $R_{22} = 73,1 \text{ Ом}$ и $X_{22} = 42,5 \text{ Ом}$, получим уравнение

$$\frac{\pi}{2} = \pi + \operatorname{arctg} \left(-\frac{24}{45} \right) - \operatorname{arctg} \frac{42,5 + X_{H2}}{73,1}.$$

Решив его, находим $X_{H2} = 95 \text{ Ом}$.

Отношение амплитуд токов рефлектора и активного вибратора определяем по формуле (8.9):

$$m = \sqrt{\frac{45^2 + 24^2}{73,1^2 + (42,5 + 95)^2}} \cong 0,33.$$

Затем по формуле (8.11) определяем сопротивление излучения активного вибратора с учетом влияния пассивного рефлектора:

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi) |_{\Delta\Phi=\pi/2} = 73,1 + 0,33 \cdot 24 \cong 81 \text{ Ом}.$$

3. Рассчитать и построить в плоскостях E и H в полярной системе координат нормированные амплитудные ДН антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов, при следующих данных: $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 2} = 73 \text{ Ом}$; $X_{\Sigma 2} = 40 \text{ Ом}$; $X_{H2} = 0$; $d = 0,15\lambda$. Определить сопротивление излучения антенны.

Решение. Из графиков рис. 8.1 находим величину активной и реактивной составляющих взаимного сопротивления вибраторов: $R_{12} \approx 60 \text{ Ом}$, $X_{12} \approx -6 \text{ Ом}$. Отношение амплитуд и сдвиг фаз токов в вибраторах определяем по формулам (8.9), (8.10):

$$m = \sqrt{\frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{\Sigma 2}^2 + (X_{\Sigma 2} + X_{H2})^2}} = \sqrt{\frac{60^2 + 6^2}{73^2 + 40^2}} \approx 0,73;$$

$$\Delta\Phi = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{\Sigma 2} + X_{H2}}{R_{\Sigma 2}} =$$

$$= \left(\pi + \operatorname{arctg} \frac{-6}{60} - \operatorname{arctg} \frac{40}{73} \right) \text{ рад} \approx 2,5 \text{ рад}.$$

По формулам (8.2) и (8.3) имеем

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos(0,5\pi \cos \theta)}{\sin \theta} \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin \theta)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}} = \frac{\cos(0,5\pi \cos \theta)}{\sin \theta} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1 + 0,73^2 + 2 \cdot 0,73 \cos\left(2,5 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0,15\lambda \sin \theta\right)}{1 + 0,73^2 + 2 \cdot 0,73 \cos\left(2,5 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0,15\lambda\right)}} \approx$$

$$\approx \frac{0,8 \cos(0,5\pi \cos \theta)}{\sin \theta} \sqrt{1,53 + 1,46 \cos(2,5 - 0,3\pi \sin \theta)};$$

$$\bar{F}(\varphi) = \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin \varphi)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1 + 0,73^2 + 2 \cdot 0,73 \cos\left(2,5 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0,15\lambda \sin \varphi\right)}{1 + 0,73^2 + 2 \cdot 0,73 \cos\left(2,5 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0,15\lambda\right)}} \approx 0,8 \sqrt{1,53 + 1,46 \cos(2,5 - 0,3\pi \sin \varphi)}.$$

Задавая дискретные значения θ и φ в пределах от 0 до 2π , рассчитываем для них $\bar{F}(\theta)$, $\bar{F}(\varphi)$ и строим графики ДН.

По формуле (8.11) получаем

$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi) = [73 + 0,73(60 \cos 2,5 + 6 \sin 2,5)] \approx 40 \text{ Ом}$, т.е. сопротивление излучения данной антенны почти в два раза меньше сопротивления излучения одиночного полуволнового вибратора.

4. Определить сопротивление излучения линейной антенной решетки, состоящей из $N = 3$ синфазных полуволновых продольных (соосных) вибраторов, ориентированных вдоль прямой линии и расположенных на расстоянии $d = \lambda/4$ от плоского рефлектора. Принять, что расстояние между vibra-

торами ничтожно мало, а рефлектор является идеально проводящим и имеет бесконечную протяженность.

Решение. Действие рефлектора можно рассматривать как действие фиктивных вибраторов $1' - 3'$, представляющих собой зеркальное изображение реальных вибраторов $1 - 3$. Тогда для вибратора 1 согласно формуле (8.22) можно записать $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 11} + R_{\Sigma 12} + R_{\Sigma 13} + R_{\Sigma 11'} + R_{\Sigma 12'} + R_{\Sigma 13'}$.

Из табл. 8.1 находим величины вносимых сопротивлений излучения:

$$\left. \begin{aligned} R_{\Sigma 12} &= 26,4 \text{ Ом} && \text{при } d/\lambda = 0 \text{ и } h/\lambda = 0,5; \\ R_{\Sigma 13} &= -4,1 \text{ Ом} && \text{при } d/\lambda = 0 \text{ и } h/\lambda = 1; \\ R_{\Sigma 11'} &= 12,5 \text{ Ом} && \text{при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 0; \\ R_{\Sigma 12'} &= 11,9 \text{ Ом} && \text{при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 0,5; \\ R_{\Sigma 13'} &= 0,8 \text{ Ом} && \text{при } d/\lambda = 0,5 \text{ и } h/\lambda = 1; \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{знаки изменены на} \\ \text{противоположные.} \end{array}$$

Считая собственное сопротивление излучения вибратора 1 равным $R_{\Sigma 11} = 73 \text{ Ом}$, находим $R_{\Sigma 1} = 120,6 \text{ Ом}$. Точно такое же сопротивление излучения имеют вибраторы $1', 3, 3'$, так как в решетке они расположены симметрично. Сопротивления излучения вибраторов 2 и $2'$ также одинаковы:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma 2} &= R_{\Sigma 2'} = R_{\Sigma 22} + 2R_{\Sigma 21} + 2R_{\Sigma 21'} + 2R_{\Sigma 22'} = \\ &= (73 + 2 \cdot 26,4 + 2 \cdot 11,9 + 2 \cdot 6,25) \text{ Ом} = 162,1 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Сопротивление излучения всей антенной решетки составит $R_{\Sigma C} = 4R_{\Sigma 1} + 2R_{\Sigma 2} = (4 \cdot 120,6 + 2 \cdot 162,1) \text{ Ом} = 806,6 \text{ Ом}$.

5. Директорная антенна, имеющая $N = 15$ вибраторов, настроена в резонанс на частоту $f = 218 \text{ МГц}$. Среднее расстояние между соседними вибраторами антенны $d_{cp} = 14 \text{ см}$. Определить параметры антенны.

Решение. Частоте $f = 218 \text{ МГц}$ соответствует длина волны $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{218 \cdot 10^6} = 1,38 \text{ м}$. Полная длина антенны равна

$$L_a = (N - 1)d_{cp} = 14 \cdot 14 = 1,96 \text{ м}, \text{ а волновая равна } \frac{L_a}{\lambda} = \frac{1,96}{1,38} \approx 1,4.$$

Параметры антенны определяем по формулам (8.28) – (8.31):

$$2\theta_{0,5}^E \approx \frac{3,5}{N-1} = \frac{3,5}{14} = 0,25 \text{ рад}; \quad 2\theta_{0,5}^H \approx \frac{3,8}{N-1} = \frac{3,8}{14} \approx 0,27 \text{ рад};$$

$$D_0 \approx 5 \left(1 + \frac{L_a}{\lambda} \right) = 5(1 + 1,4) = 12; \quad S_{\phi} = \frac{D_0 \lambda^2}{4\pi} = \frac{12 \cdot 1,38^2}{4\pi} \approx 1,82 \text{ м}^2.$$

6. Синфазная волноводно-щелевая антенная решетка с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода сечением $a \times b = 7,2 \times 3,4 \text{ см}^2$, состоит из $N = 10$ щелей и работает на волне основного типа. Рабочая длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$. На какое расстояние должны быть смещены

щели относительно узкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн?

Решение. Согласно условию (8.39) и формулам (8.38), (8.37) имеем

$$10 \cdot 2,09 \frac{a \lambda_g}{b \lambda} \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x_0}{a}\right) = 1.$$

Подставив в это выражение найденное по формуле (8.34) отношение $\lambda/\lambda_g = 1,4$, получим

$$10 \cdot 2,09 \cdot \frac{7,2}{3,4} \cdot 1,4 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2 \cdot 1,4}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x_0}{a}\right) = 1,$$

откуда

$$\cos \frac{\pi x_0}{a} = 0,295; \quad \frac{\pi x_0}{a} = \arccos 0,295 \cong 1,27; \quad x_0 = \frac{1,27a}{\pi} = \frac{1,27 \cdot 7,2}{\pi} \approx 2,91 \text{ см.}$$

7. Рассчитать волноводную щелевую антенную решетку, которая должна работать на волне основного типа, иметь КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 12,6$ и излучать мощность $P_\Sigma = 50 \text{ кВт}$. Рабочая длина волны $\lambda = 3,2 \text{ см}$.

Решение. Выбираем стандартный волновод с внутренними размерами $a = 23 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$. Длина волны в волноводе равна

$$\lambda_g = \frac{3,2}{\sqrt{1 - (3,2/4,6)^2}} = \frac{3,2}{0,71} = 4,5 \text{ см.}$$

Характеристическое сопротивление и проводимость волновода равны

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} = 531 \text{ Ом}; \quad G_c = \frac{1}{Z_c} = 0,188 \cdot 10^{-2} \text{ См.}$$

Число щелей в волноводе находим по формуле (8.41):

$$N = \frac{D_0}{3,2} = \frac{12,6}{3,2} \approx 4.$$

Для определенности выберем продольные полуволновые $2l = \lambda_g/2$ щели, прорезанные в широкой стенке волновода с интервалом в половину длины волны $\lambda_g/2$. Проводимость одной щели равна

$$G_1 = G_c \frac{1}{N} = \frac{0,188 \cdot 10^{-2}}{4} = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Для согласования щели с волноводом смещаем ее относительно осевой линии на величину $x_1 = (a/2 - x_0)$, определяемую согласно (8.37) из уравнения

$$\bar{G}_1 = 2,09 \frac{a \lambda_g}{b \lambda} \sin^2\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g}\right).$$

Если число щелей N , то в согласованном режиме $\bar{G}_1 = \frac{1}{N}$. В данном случае

$$\bar{G}_1 = \frac{1}{4} = 0,25. \text{ Отсюда находим } x_1:$$

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) &= \sqrt{\frac{\bar{G}_1}{2,09 \frac{a \lambda_g}{b \lambda} \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g}\right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10 \cdot 32}{2,09 \cdot 23 \cdot 45 \cos^2\left(\frac{\pi \cdot 32}{2 \cdot 45}\right)}} = 0,4386; \\ x_1 &= \frac{a}{\pi} (\arcsin 0,4386) = \frac{23 \cdot 0,454}{3,1416} = 3,3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Определим ширину щели b . Она должна быть меньше $\lambda_g/10 = 4,5$ мм, но достаточно большой, чтобы исключить возможность электрического пробоя. Полагая, что вся мощность излучения антенны P_Σ распределяется поровну между щелями, находим значение напряжения в максимуме распределения на каждой щели

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{2P_\Sigma}{NG_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}}} = 7,36 \text{ кВ.}$$

При двукратном запасе прочности и пробивной напряженности электрического поля $E_{\text{проб}} = 30$ кВ/см получим

$$b = \frac{2U_{\max}}{E_{\text{проб}}} = \frac{2 \cdot 7,36}{30} \cong 4,9 \text{ мм.}$$

За счет небольшого сокращения запаса прочности ширину щели можно уменьшить до выбранного выше предела.

Радиус эквивалентного электрического вибратора равен четверти ширины щели

$$a_{\text{эке}} = \frac{b}{4} = \frac{4,5}{4} \approx 1,1 \text{ мм.}$$

Для определения волнового сопротивления эквивалентного вибратора воспользуемся формулой (6.15)

$$W_{\text{вщ}} = 120 \left(\ln \frac{l}{a_{\text{эке}}} - 1 \right) = 120 \left(\ln \frac{\lambda_g}{4a_{\text{эке}}} - 1 \right) = 120 \left(\ln \frac{45}{4 \cdot 1,1} - 1 \right) \approx 160 \text{ Ом.}$$

Геометрическая длина полуволновой щели с учетом эффекта укорочения – формула (6.30), – определяется как

$$2l = \frac{\lambda_g}{2} - 2\Delta l = \frac{\lambda_g}{2} - \frac{13,6 \cdot \lambda_g}{W_{\text{вщ}}} = \frac{45}{2} - \frac{13,6 \cdot 45}{160} = 18,7 \text{ мм.}$$

Расчет ДН в плоскости, проходящей через продольную ось волновода перпендикулярно его широкой стенке, можно провести по теореме о перемножении диаграмм направленности, рассматривая антенну как решетку N

синфазных эквивалентных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $\lambda_g/2$ друг от друга,

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \cdot \frac{\sin \frac{N\Delta\Phi}{2}}{N \sin \frac{\Delta\Phi}{2}},$$

где $\Delta\Phi$ – сдвиг по фазе, обусловленный геометрической разностью хода лучей (волн) от двух соседних щелей, которая равна $\frac{\lambda_g}{2} \cos \theta$; θ – угол между осью волновода и направлением в точку наблюдения; $k = 2\pi/\lambda$. Этот сдвиг равен

$$\Delta\Phi = k\left(\frac{\lambda_g}{2} \cos \theta\right) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_g}{2} \cos \theta\right) = \left(\frac{2\pi}{3,2} \cdot \frac{4,5}{2} \cos \theta\right) = (4,42 \cos \theta) \text{ рад.}$$

Окончательно

$$\bar{F}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \cdot \frac{\sin(8,84 \cos \theta)}{\sin(2,21 \cos \theta)}.$$

8.3 Задачи для самостоятельного решения

8.1. Определить сопротивление излучения и максимальный КНД антенны, состоящей из двух параллельных, имеющих общую экваториальную плоскость активных полуволновых вибраторов, возбуждаемых токами с одинаковыми амплитудами и сдвигом фаз $\Delta\Phi = \pi/2$. Расстояние между вибраторами $d = \lambda/2$.

Ответ: $R_{\Sigma C} = 146,2 \text{ Ом}; D_C = 3,28$.

8.2. Определить сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволнового активного и пассивного вибраторов при расстоянии между ними $d = 0,225\lambda$. Считать, что пассивный вибратор настроен с помощью реактивного сопротивления X_{H2} так, что его ток опережает по фазе ток активного вибратора на угол $\Delta\Phi = \pi/2$. Реактивная составляющая сопротивления пассивного вибратора равна $X_{\Sigma H2} = 42,5 \text{ Ом}$.

Ответ: $R_{\Sigma C} \approx 81 \text{ Ом}$.

8.3. Определить сопротивление излучения симметричного волнового вибратора, отнесенное к его току в максимуме, рассматривая этот вибратор как систему, состоящую из двух полуволновых вибраторов.

Ответ: 200 Ом .

8.4. Два одинаковых симметричных вибратора длиной $2l = 0,8\lambda$ расположены параллельно друг другу на расстоянии $d = 0,25\lambda$. Вибраторы возбуждаются синфазными токами, амплитуды которых на входе вибраторов одинаковы и равны 1 А . Определить амплитуды напряженности электрического

поля: 1) в точке, находящейся в плоскости расположения вибраторов на оси системы и на расстоянии $r = 1\ 000\ м$ от ее центра; 2) в точке, находящейся в плоскости, ортогональной плоскости расположения вибраторов, на второй оси системы и на расстоянии $r = 1\ 000\ м$ от ее центра.

Ответ: $E_1 = 0,26\ В/м$; $E_2 = 0,368\ В/м$.

8.5. Два симметричных полуволновых вибратора расположены на расстоянии $r = 1\ 000\ м$ друг от друга так, что их оси параллельны друг другу и перпендикулярны прямой, проходящей через центры вибраторов. Один из вибраторов работает в режиме передачи, другой – в режиме приема. Длина волны $\lambda = 1\ м$. Определить мощность, выделяемую в согласованной нагрузке приемного вибратора, если известно, что амплитуда тока на входных зажимах передающего вибратора равна $1\ А$. Определить также действующую длину приемного вибратора и амплитуду ЭДС, наведенной в этом вибраторе электромагнитной волной, излучаемой передающим вибратором.

Ответ: $P_{ПП} = 1,28 \cdot 10^{-6}\ Вт$; $I_{эф} = 0,32\ м$; $\mathcal{E} = 0,02\ В$.

8.6. Определить угол, на который смещается главный максимум излучения линейной равноамплитудной эквидистантной решетки, состоящей из $N = 17$ изотропных излучателей, при разности фаз между токами соседних излучателей $\Delta\Phi = \pi/4\ рад$ и ширине луча антенны $2\theta_{0,5} = 0,21\ рад$.

Ответ: $\theta_{2л} = \frac{\pi}{6}\ рад$.

8.7. Определить длину волны, на которой работает линейная равноамплитудная эквидистантная ($d = 1\ м$) синфазная решетка изотропных излучателей, имеющая длину $L = 5\ м$, если максимумы двух первых боковых лепестков нормированной амплитудной ДН находятся под углами $\theta_1 = \pm(\pi/6)\ рад$ относительно нормали к линии расположения излучателей. Определить ширину ДН (в радианах) и максимальный КНД антенны.

Ответ: $\lambda = 2\ м$; $2\theta_{0,5} \approx 0,3\ рад$; $D_0 \approx 338$.

8.8. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = 0,4\lambda$) решетки, состоящей из $N = 6$ синфазных продольных полуволновых вибраторов.

Ответ: $R_{\Sigma C} = 413,6\ Ом$.

8.9. Определить в плоскости E ширину ДН (в радианах) на уровне $0,5$ по мощности директорной антенны, имеющей соответственно 2, 3, 4, 5, 6, и 10 директоров. По полученным данным построить графическую зависимость $2\theta_{0,5}^E = f(N)$, где N – полное число вибраторов в антенне.

Ответ: $2\theta_{0,5}^E \approx 1,17; 0,875; 0,7; 0,584; 0,5; 0,318\ (рад)$.

8.10. Директорная антенна, имеющая $N = 7$ вибраторов, настроена в резонанс на среднюю частоту третьего телевизионного канала $f = 80\ МГц$.

Общая длина антенны $L = 2,4$ м. Определить в плоскостях H и E ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности, максимальный КНД и эффективную площадь антенны.

Ответ: $2\theta_{0,5}^H \approx 0,634$ рад; $2\theta_{0,5}^E \approx 0,584$ рад; $D_0 \approx 8,2$; $S_{эф} = 9,2$ м².

8.11. Логопериодическая антенна, угол раскрытия полотна вибраторов которой $2\beta = 0,525$ рад, в плоскости H имеет ширину ДН на уровне 0,5 по мощности $2\theta_{0,5}^H = 1,925$ рад. Определить безразмерный период структуры и ширину ДН в плоскости E .

Ответ: $\tau = 0,75$; $2\theta_{0,5}^E = 1,2$ рад.

8.12. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 20$ продольных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 8$ см. На какое расстояние x_0 (в см) следует сместить щели относительно узкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 6,1 \times 1$ см.

Ответ: $x_0 \approx 2,78$ см.

8.13. Несинфазная волноводно-щелевая антенна, выполненная на волноводе сечением $a \times b = 2,85 \times 1,26$ см, работает на волне длиной $\lambda = 3,8$ см. Определить, на какой угол (в радианах) смещается максимум нормированной амплитудной ДН антенны относительно нормали к широкой стенки волновода при: а) синфазно связанных с полем волновода щелях; б) переменноразно связанных с полем волновода щелях со сдвигом фаз между соседними щелями, равным $\Delta\Phi = 3,4$ рад.

Ответ: а) $\delta\theta = 0,84$ рад; б) $\delta\theta \approx 57$ мрад.

8.14. Главный максимум несинфазной волноводно-щелевой антенны, выполненной на волноводе сечением $a \times b = 5,8 \times 2,5$ см, смещен относительно нормали к широкой стенки волновода на угол $\delta\theta = 0,1$ рад. На какой частоте работает антенна, если сдвиг фаз между соседними щелями, переменноразно связанными с полем волновода, составляет $\Delta\Phi = 3,9$ рад?

Ответ: $f \approx 3000$ МГц.

8.15. Определить в горизонтальной и вертикальной плоскостях ширину ДН (в радианах) плоской равноамплитудной эквидистантной ($d = 0,6 \lambda$) решетки синфазных полуволновых горизонтальных вибраторов на уровнях 0,5 по мощности и нулевого излучения и рассчитать максимальный КНД антенны при условии, что число вибраторов в антенне составляет $N_x = 4$, $N_y = 6$, а ее сопротивление излучения равно $R_{\Sigma C} = 520$ Ом.

Ответ: $2\theta_{0,5}^F = 0,495$ рад; $2\theta_{0,5}^B = 0,297$ рад; $2\theta_0^F = 1$ рад;

$2\theta_{0,5}^B = 0,666$ рад; $D_0 = 133$.

Контрольная работа № 3

Вариант № 1

1. Элементарный электрический вибратор длиной 1 м излучает электромагнитные волны длиной 10 м. Амплитуда тока в вибраторе равна 10 А. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей вибратора на расстоянии 10 км от вибратора в его экваториальной плоскости.

2. Активная часть входного сопротивления симметричного волнового вибратора $R_{\text{вх}} = 3,2 \text{ кОм}$. Определить диаметр вибратора, если частота генератора $f = 75 \text{ МГц}$.

3. Определить максимальный коэффициент усиления и эффективную площадь излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода с поперечным сечением $a \times b = 2,3 \times 1 \text{ см}$, работающего на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$. Потери не учитывать.

4. Радиус раскрыва параболоида вращения составляет $a_p = 1 \text{ м}$. Определить полный угол раскрыва зеркала $2\psi_p$ (в градусах) для трех различных фокусных расстояний: $f_1 = 0,25 \text{ м}$; $f_2 = 0,5 \text{ м}$; $f_3 = 1,25 \text{ м}$.

5. Определить сопротивление излучения и максимальный КНД антенны, состоящей из двух параллельных, имеющих общую экваториальную плоскость активных полуволновых вибраторов, возбуждаемых синфазными ($\Delta\Phi = 0$) токами с одинаковыми амплитудами. Расстояние между вибраторами $d = \lambda/2$.

Вариант № 2

1. Элементарный электрический вибратор длиной $l = 20 \text{ см}$ возбуждается током, амплитуда которого $I_0 = 5 \text{ А}$, а частота $f = 30 \text{ МГц}$. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей вибратора в точке наблюдения, находящейся на расстоянии $r = 1 \text{ км}$ от вибратора под углом $\theta = \pi/4 \text{ рад}$ к его оси. Чему равно сопротивление излучения вибратора?

2. Определить на волне длиной 100 м входное сопротивление симметричного вибратора общей длиной 2 м, если его волновое сопротивление составляет 800 Ом. Потери не учитывать.

3. Определить ширину ДН (в радианах) в H - и E -плоскостях и максимальный КНД излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода сечением $a \times b = 6,1 \times 1 \text{ см}$, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 6 \text{ см}$.

4. Рассчитать диаметр $2a_p$ и фокусное расстояние f_a параболической зеркальной антенны, если требуемая ширина ДН в плоскости H составляет 1° , длина волны $\lambda = 3,2 \text{ см}$, отношение радиуса раскрыва к двойному фокусному расстоянию равно $a_p / 2f_a = 0,6$.

5. Антенна, состоящая из двух активных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $d = 0,8\lambda$ друг от друга, возбуждается так, что от-

ношение амплитуд токов в вибраторах $m = 0,5$, а сдвиг фаз $\Delta\Phi = \pi$. Определить сопротивление излучения и максимальный КНД антенны.

Вариант № 3

1. Электрически малая круглая рамка диаметром $6,36$ см на частоте 300 МГц возбуждается током, амплитуда которого равна 1 А. Определить амплитуду напряженности электрического и магнитного полей в точке, расположенной в плоскости рамки на расстоянии $1\ 000$ м от ее центра.

2. Симметричный вибратор длиной $2l = 3/4\lambda$ выполнен из проводника диаметром $2a/\lambda = 0,02$. Рассчитать активную и реактивную составляющие входного сопротивления вибратора, пренебрегая потерями на его нагрев.

3. Максимальный КНД открытого конца прямоугольного волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 8,6$ см, равен $D_0 = 3,4$. Размер широкой стенки волновода $a = 7,2$ см. Определить размер его узкой стенки.

4. Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, работающей на волне длиной $\lambda = 2$ см и имеющей максимальный КНД $D_0 = 10\ 000$. Угол раскрыва зеркала составляет $2\psi_p = 1,6$ рад.

5. Определить сопротивление излучения и максимальный КНД антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов с параметрами: $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 2} = 73$ Ом; $X_{\Sigma 2} = 30$ Ом; $X_{H2} = 0$; $d = 0,1\lambda$.

Вариант № 4

1. Амплитуда напряженности магнитного поля на расстоянии $r = 100$ м от элементарной рамки в направлении ее максимального излучения $H_0 = 3,6$ мкА/м. Рамка на частоте $f = 12$ МГц возбуждается током, амплитуда которого $I_0 = 9$ А. Определить диаметр рамки.

2. Симметричный вибратор длиной 4 м, сопротивление которого 600 Ом, соединен с генератором отрезком фидера длиной 5 м. Волновое сопротивление фидера 450 Ом. Определить мощность излучения антенны на волне длиной 4 м, если амплитуда тока в начале фидера (у генератора) равна 200 мА.

3. Во сколько раз ширина ДН открытого конца прямоугольного волновода на уровне $0,5$ по мощности в плоскости E больше ширины ДН на том же уровне в плоскости H , если размеры сечения волновода связаны соотношением $a = 2b$?

4. Определить КНД в направлении максимума излучения зеркальной антенны в виде параболоида вращения диаметром $d_p = 60$ см, работающей на волне длиной $\lambda = 2$ см.

5. Определить сопротивление излучения и максимальный КНД антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов с параметрами: $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 2} = 73$ Ом; $X_{\Sigma 2} = X_{H2} = 0$; $d = 0,2\lambda$.

Вариант № 5

1. Элементарная излучающая щель длиной $l = 1$ см возбуждается напряжением, амплитуда которого $U_{щ} = 12B$, а частота $f = 600$ МГц. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в точке наблюдения, находящейся на расстоянии $r = 10$ м от щели под углом $\theta = 4\pi/9$ рад к ее оси. Чему равна проводимость излучения щели?

2. Симметричный волновой вибратор, имеющий волновое сопротивление 707 Ом, соединен с генератором отрезком фидера длиной $2,5$ м. Волновое сопротивление фидера 500 Ом. Определить амплитуду тока на входе вибратора, если амплитуда тока в начале фидера равна $0,5$ А. Длина волны составляет 2 м.

3. Излучатель в виде открытого конца прямоугольного волновода характеризуется параметрами: $2\theta_{0,5}^H = 1,75$ рад; $2\theta_{0,5}^E = 1,4$ рад. Определить КНД излучателя в направлении максимума ДН.

4. Какое из трех значений угла раскрытия параболической зеркальной антенны $2\psi_p = 70^\circ, 180^\circ, 260^\circ$ является наиболее приемлемым, если в качестве облучателя используется диполь?

5. Рассчитать сопротивление излучения системы двух противофазных полуволновых вибраторов, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $d = 0,7\lambda$ и смещенных относительно оси на расстояние h , равное: а) 0; б) $\lambda/2$; в) λ ; г) $3\lambda/2$. По полученным данным построить график зависимости сопротивления излучения от относительного смещения вибраторов h/λ .

Вариант № 6

1. Электрически малая щель длиной $0,02$ м и шириной $0,1$ см прорезана в идеально проводящем плоском экране. Щель в средних точках на частоте 300 МГц возбуждается сосредоточенной ЭДС. Определить амплитуду напряженности электрического поля в щели, при которой максимальная напряженность ее электрического поля на расстоянии 1000 м будет равна $3,77 \cdot 10^{-3}$ В/м.

2. Полуволновой симметричный вибратор соединен с генератором отрезком фидера длиной 7 м. Волновое сопротивление фидера 500 Ом. Определить мощность излучения антенны и амплитуду напряжения в начале фидера (у генератора), если амперметр там показывает ток $0,5$ А. Длина волны 4 м.

3. Определить длину волны, на которой возбуждается открытый конец круглого волновода диаметром $2a = 3,6$ см, если его максимальный КНД равен $D_0 = 3,7$.

4. Зеркальная антенна представляет собой параболоид вращения диаметром 1 м, облучаемый элементарным электрическим вибратором с контррефлектором. Отношение радиуса раскрытия параболоида к его фокусному расстоянию оптимальное. На волне длиной 10 см определить максимальный КНД и в главных плоскостях ширину ДН (в градусах) по уровню половинной мощности.

5. Два тонких полуволновых вибратора расположены параллельно друг другу на расстоянии d так, что их экваториальные плоскости совпадают. Определить взаимные сопротивления вибраторов при следующих расстояниях между ними: $d = \lambda/4$; $d = \lambda/2$.

Вариант № 7

1. Элемент Гюйгенса на волне длиной $\lambda = 10$ см возбуждается сторонним электрическим полем, амплитуда напряженности которого $E_0 = 1$ кВ/м. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в точке наблюдения с координатами $r = 8$ м, $\theta = \pi/6$ рад, $\varphi = \pi/4$ рад, если размеры излучающей поверхности $a = 1$ см, $b = 2$ см.

2. Мощность излучения симметричного вибратора длиной $3\lambda/4$ равна 5 кВт. Ток на входе антенны составляет $3,78$ А. Определить сопротивление излучения, отнесенное к току в максимуме.

3. Во сколько раз ширина ДН открытого конца круглого волновода на уровне $0,5$ по мощности в плоскости H больше ширины луча на том же уровне в плоскости E ?

4. Параболическая антенна с осесимметричным зеркалом, относительный диаметр раскрыва которого $d_p/\lambda = 20$, возбуждается полуволновым вибратором с контррефлектором в виде диска. Угол раскрыва зеркала $2\psi_p = 1,84$ рад. Определить относительное фокусное расстояние, ширину ДН (в радианах) в плоскости H и максимальный КНД антенны.

5. Два тонких полуволновых вибратора расположены параллельно друг другу на расстоянии d так, что их экваториальные плоскости совпадают. Определить взаимные сопротивления вибраторов при следующих расстояниях между ними: $d = 3\lambda/4$; $d = \lambda$.

Вариант № 8

1. Определить параметры поляризационного эллипса передающей антенны, если отношение амплитуд ортогональных компонент излучаемого поля $m = 0,7$, а разность их фаз $\psi = \pi/4$ рад.

2. Определить максимальный КНД тонкого симметричного вибратора длиной $2l = 0,8\lambda$.

3. Максимальный КНД открытого конца круглого волновода $D_0 = 5$. Определить ширину ДН (в радианах) на уровне $0,5$ по мощности в плоскостях H и E .

4. Определить максимальный КНД и в главных плоскостях ширину ДН (в градусах) зеркальной антенны, состоящей из параболоида вращения (радиус раскрыва $a_p = 1$ м, фокусное расстояние $f_a = 0,5$ м) и облучателя в виде диполя с дисковым контррефлектором. Длина волны $\lambda = 3,2$ см.

5. Два симметричных полуволновых вибратора расположены параллельно друг другу на расстоянии $d = 1,1\lambda$ так, что их экваториальные плоско-

сти совпадают. Амплитуда тока на входе второго вибратора в два раза больше амплитуды тока на входе первого вибратора, а ток второго вибратора опережает по фазе ток первого вибратора на угол 30° . Определить полные входные сопротивления вибраторов с учетом их взаимодействия.

Вариант № 9

1. Чему должны быть равны отношения и разность фаз ортогональных компонент излучаемого антенной поля, чтобы параметры поляризованного эллипса были следующие: $K_\Sigma = 0,8$; $\gamma_\Sigma = \pi / 6 \text{ рад}$?

2. Приемный полуволновой вибратор без потерь работает на частоте $f = 300 \text{ МГц}$ и максимумом ДН ориентирован на передатчик. Определить мощность, которая выделяется в согласованной нагрузке вибратора, если известно, что амплитуда напряженности электрического поля в месте приема равна 1 мВ/м .

3. Ширина ДН открытого конца круглого волновода на уровне $0,5$ по мощности в плоскости H равна $2\theta_{0,5}^H = 1,75 \text{ рад}$. Определить максимальный КНД антенны и ширину ее ДН на указанном уровне в плоскости E .

4. Определить диаметр зеркала и его фокусное расстояние для антенны (параболоид вращения с углом раскрыва $2\psi_p = 120^\circ$ и облучателем в виде диполя с дисковым контррефлектором) на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$, если максимальный КНД антенны составляет $D_0 = 10\,000$. Оценить среднюю ширину ДН $2\theta_{0,5}^\circ$ (в градусах).

5. Антенна однонаправленного излучения состоит из параллельных активных полуволнового вибратора и рефлектора, расположенных друг от друга на расстоянии $d = 0,25 \lambda$. Экваториальные плоскости вибраторов совпадают. Определить полные входные сопротивления вибраторов с учетом их взаимного влияния.

Вариант № 10

1. Нормированные парциальные ДН передающей антенны круговой поляризации описываются выражениями $F_\theta(\theta, \varphi) = F_\varphi(\theta, \varphi) = \bar{F}(\theta) = 0,5(1 + \cos^2 \theta)$. Определить парциальные КНД для компонент поля E_θ и E_φ , а также результирующий КНД антенны.

2. Симметричный вибратор длиной $2l = 0,08 \text{ м}$ работает на частоте $f = 3 \text{ ГГц}$. Амплитуда тока на входе вибратора равна 1 А . Определить амплитуду напряженности электрического поля в точке, расположенной в его экваториальной плоскости на расстоянии $r = 1\,000 \text{ м}$ от центра вибратора.

3. Прямоугольная апертура с размерами $a \times b = 30 \times 150 \text{ см}^2$ излучает на волне длиной 3 см . Распределение фазы поля в пределах апертуры постоянное, а амплитуда поля постоянна вдоль размера b , а вдоль размера a изменяется по косинусоидальному закону от максимума в середине до нуля на

краях. Определить эффективную поверхность и максимальный КНД апертуры.

4. Как и во сколько раз изменятся максимальный КНД и ширина ДН в плоскостях E и H зеркальной антенны (параболоид вращения с отношением радиуса к двойному фокусному расстоянию $a_p / 2f = 0,4$), если при прочих равных параметрах уменьшить ее фокусное расстояние в 2,5 раза? Считать, что зеркало облучается диполем с дисковым контррефлектором.

5. Два противофазных полуволновых вибратора расположены параллельно на расстоянии $d = \lambda/2$. Центры вибраторов смещены друг относительно друга на расстояние $h = \lambda/2$. Определить полные входные сопротивления вибраторов при условии, что амплитуды токов на их входах одинаковы.

Вариант № 11

1. Эффективная длина приемной антенны $l_{эф} = 10$ м. Определить ЭДС, наводимую в антенне приходящим сигналом с напряженностью электрического поля $E = 15$ мкВ/м, если прием осуществляется с направления максимума ДН, а угол между плоскостями поляризации антенн составляет $\chi = 60^\circ$.

2. Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $2l = 24$ см, выполненного из провода диаметром $2a = 16$ мм, если длина волны генератора $\lambda = 25$ см.

3. Определить эффективную высоту и сопротивление излучения, отнесенное к максимуму тока и к току у основания несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $h = 150$ м, работающего на волне длиной $\lambda = 250$ м.

4. Определить КНД и ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E оптимального H -плоскостного секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на волне $\lambda = 3,2$ см. Длина рупора $L_{ом}^H = 25$ см. Размеры горловины рупора: $a = 2,3$ см, $b = 1$ см.

5. Определить длину волны, на которой работает линейная равноамплитудная эквидистантная ($d = 1$ м) синфазная решетка изотропных излучателей, имеющая длину $L_a = 5$ м, если максимумы двух первых боковых лепестков нормированной амплитудной ДН находятся под углами $\theta_1 = \pm(\pi/6)$ относительно нормали к линии расположения излучателей. Определить также ширину ДН антенны (в радианах) и ее КНД.

Вариант № 12

1. Определить напряжение U_n на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору длиной $2l = 10$ м, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 50$ мкВ/м. Входное сопротивление приемника $R_n = 160$ Ом, сопротивление потерь в антенне $R_{л} = 10$ Ом.

2. Определить частоту передатчика, на которой будет настроен в резонанс подключенный к нему симметричный волновой вибратор, имеющий длину $2l = 20$ см и диаметр провода $2a = 10$ мм.

3. Определить активную и реактивную составляющие входного сопротивления, а также КПД несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $l = 135$ м, работающего на волне длиной $\lambda = 700$ м. Радиус вибратора $a = 5$ мм, сопротивление активных потерь $R_{\Pi} = 4,6$ Ом.

4. Оптимальный H -плоскостной секториальный рупор длиной $L_{opt}^H = 90$ см имеет КНД $D_0 = 25$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E , если один из размеров раскрыва рупора равен $b_p = 3,4$ см.

5. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = 0,4\lambda$) системы, состоящей из $N = 6$ синфазных полуволновых вибраторов.

Вариант № 13

1. Определить напряжение U_n на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 100$ мкВ/м, а длина волны $\lambda = 30$ м. Входное сопротивление приемника $R_n = 200$ Ом. Потерями в антенне пренебречь.

2. Резонансная щелевая полуволновая антенна имеет длину $2l = 14$ см и принимает сигналы частотой $f = 1$ ГГц. Определить ширину щели.

3. Определить входное сопротивление несимметричного вертикального заземленного вибратора, установленного над идеально проводящей землей, при относительной высоте вибратора h/λ , равной: а) 0,125; б) 0,25; в) 0,3; г) 0,5; д) 0,8. Волновое сопротивление вибратора $w_g = 500$ Ом.

4. Оптимальный E -плоскостной секториальный рупор имеет КНД $D_0 = 40$ при длине $L_{opt}^E = 80$ см. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E , если один из размеров раскрыва рупора равен $a_p = 2,3$ см.

5. Определить в плоскости E ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности директорной антенны, имеющей соответственно 2, 3, 4, 5, 6, и 10 директоров. По полученным данным построить графическую зависимость $2\theta_{0,5}^E = f(N)$, где N – полное число вибраторов в антенне.

Вариант № 14

1. Определить максимальную мощность, которую может отдать в согласованную нагрузку приемный полуволновой вибратор длиной $2l = 10$ м при напряженности электрического поля в точке приема $E = 100$ мкВ/м. Найти эффективную площадь этого вибратора, пренебрегая потерями в нем.

2. Определить амплитуду тока у основания несимметричного вертикального заземленного вибратора, если мощность, подводимая к нему, $P = 40 \text{ кВт}$, а входное сопротивление вибратора $R_{\text{вх}} = 80 \text{ Ом}$.

3. Несимметричный вертикальный заземленный вибратор имеет высоту $l = 100 \text{ м}$ и волновое сопротивление $w_e = 300 \text{ Ом}$. Активная составляющая входного сопротивления вибратора $R_{\text{вх}} = 4,8 \text{ Ом}$. Рассчитать элемент настройки вибратора, сопротивление излучения, отнесенное к максимуму тока и к току у основания вибратора, а также КПД при работе на волне длиной $\lambda = 800 \text{ м}$.

4. Эффективная поверхность оптимальной E -плоскостной секториальной рупорной антенны $S_{\text{эф}} = 180 \text{ см}^2$. Определить КНД и ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E при работе на волне длиной $\lambda = 6 \text{ см}$, если один из размеров раскрыва рупора равен $a_p = 5,8 \text{ см}$.

5. Директорная антенна, имеющая $N = 7$ вибраторов, настроена в резонанс на среднюю частоту третьего телевизионного канала $f = 80 \text{ МГц}$. Полная длина антенны $L = 2,4 \text{ м}$. Определить КНД, эффективную площадь и ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E .

Вариант № 15

1. Мощность, отдаваемая приемной антенной в несогласованную нагрузку, $P = 1 \text{ мВт}$. Сопротивление излучения антенны $R_{\Sigma\text{вх}} = 300 \text{ Ом}$, а возбуждаемая в ней ЭДС $\mathcal{E} = 400 \text{ мВ}$. Определить коэффициент согласования антенны с нагрузкой. Потери пренебречь.

2. Определить максимальные напряженности электрического и магнитного полей, создаваемые несимметричной вертикальной заземленной четвертьволновой антенной в точке приема на расстоянии $r = 120 \text{ км}$ от антенны, если подводимая к ней мощность $P = 10 \text{ кВт}$, а активная составляющая входного сопротивления $R_{\text{вх}} = 40 \text{ Ом}$.

3. Определить параметры (резонансную длину волны, эффективную высоту, входное сопротивление, КПД) несимметричного вертикального заземленного четвертьволнового вибратора высотой $l = 140 \text{ м}$, радиус которого $a = 3 \text{ мм}$, а сопротивление потерь $R_{\text{л}} = 6,5 \text{ Ом}$.

4. Определить размеры раскрыва оптимального пирамидального рупора, КНД которого $D_0 = 30$, если ширина ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях одинакова ($2\theta_{0,5}^H = 2\theta_{0,5}^E$), а длина волны $\lambda = 3 \text{ см}$.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 20$ продольных полуволновых щелей, работает на волне $\lambda = 8 \text{ см}$. На какое расстояние x_0 (в см) следует сместить щели относительно узкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 6,1 \times 1 \text{ см}$.

Вариант № 16

1. Определить мощность, отдаваемую приемной антенной в нагрузку, не согласованную с фидером, при условии, что входное сопротивление антенны равно волновому сопротивлению фидера, а коэффициент бегущей волны в фидере КБВ = 0,8. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 10$ см и имеет КУ $G_0 = 500$. Напряженность электрического поля в точке приема $E = 1$ мВ/м, КПД антенно-фидерного устройства $\eta_{АФУ} = 1$.

2. Тонкий симметричный вибратор длиной $2l = 0,08$ м на частоте $f = 3$ ГГц возбуждается переменной ЭДС. Амплитуда тока в точках возбуждения вибратора равна 1 А. Найти амплитуду напряженности электрического поля в точке, расположенной в его экваториальной плоскости на расстоянии $r = 1000$ м от центра вибратора.

3. Симметричный вибратор длиной $2l = 3\lambda/4$ выполнен из круглого проводника с относительным диаметром $2a/\lambda = 0,02$. Рассчитать активную и реактивную составляющие входного сопротивления вибратора, пренебрегая потерями.

4. Определить КНД и ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E оптимального конического рупора, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 3,2$ см. Длина рупора $L_{opt} = 6$ см.

5. Несинфазная волноводно-щелевая антенна, выполненная на волноводе сечением $a \times b = 2,85 \times 1,26$ см, работает на волне $\lambda = 3,8$ см. Определить, на какой угол смещается главный максимум нормированной амплитудной ДН антенны (в радианах) относительно нормали к широкой стенке волновода при: а) синфазно связанных с полем волновода щелях; б) переменноразно связанных щелях со сдвигом фаз $\Delta\Phi = 3,4$ рад между соседними щелями.

Вариант № 17

1. Антенна, принимающая сигнал на частоте $f = 3000$ МГц, имеет параметры: $S_{эф} = 1,4$ м²; $D = 2000$. Определить собственную шумовую температуру антенны, если температура окружающей среды $T_0 = 300^\circ$ К.

2. Симметричный вибратор длиной $2l = 0,4$ м работает на волне длиной $\lambda = 0,5$ м. Определить КНД в направлении максимума ДН.

3. Симметричный вибратор имеет волновое сопротивление $w_g = 800$ Ом и диаметр $2a = 10$ мм. Определить рабочую частоту, пренебрегая эффектом укорочения вибратора.

4. Оптимальная коническая рупорная антенна имеет КНД $D_0 = 50$. Длина рупора $L_{opt} = 40$ см. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E .

5. Определить сопротивление излучения и КНД антенны, состоящей из двух синфазных активных полуволновых вибраторов, питаемых токами с одинаковыми амплитудами. Расстояние между вибраторами $d = \lambda/2$.

Вариант № 18

1. Сопротивление излучения элементарного электрического вибратора $R_{\Sigma} = 0,2 \text{ Ом}$. Напряженность магнитного поля на расстоянии $r = 500 \text{ м}$ от вибратора в направлении его максимального излучения $H_{\varphi} = 10 \text{ мкА/м}$. Определить амплитуду тока в вибраторе.

2. Определить эффективную длину симметричного полуволнового вибратора, работающего на частоте $f = 30 \text{ МГц}$.

3. Открытый конец прямоугольного волновода характеризуется параметрами: $2\theta_{0,5}^H = 2 \text{ рад}$, $D_0 = 1,5$. Определить относительные (волновые) размеры сечения волновода.

4. Определить КБВ в фидере рупорного облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом, относительный диаметр раскрыва которого $d_p/\lambda = 12$, а половина угла раскрыва зеркала $\psi_p = 0,78 \text{ рад}$. КНД облучателя равен $D_{\text{обл}} = 5,6$.

5. Антенна, состоящая из двух активных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $d = 0,8\lambda$ друг от друга, питается так, что отношение амплитуд токов в вибраторах $m = 0,5$, а сдвиг фаз $\Delta\Phi = \pi$. Определить сопротивление излучения и КНД антенны.

Вариант № 19

1. Напряженность магнитного поля на расстоянии $r = 5 \text{ км}$ от элементарной излучающей щели в направлении ее максимального излучения $H_{\theta} = 25 \text{ мкА/м}$. Щель имеет размеры $l = 2 \text{ см}$, $b = 1 \text{ мм}$ и возбуждается на частоте $f = 300 \text{ МГц}$. Определить напряженность электрического поля в щели.

2. Приемный полуволновой вибратор без потерь работает на частоте $f = 300 \text{ МГц}$ и максимумом ДН ориентирован на передатчик. Определить мощность, которая выделяется в согласованной нагрузке вибратора, если известно, что амплитуда напряженности электрического поля в месте приема равна 1 мВ/м .

3. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и КНД излучателя в виде открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$. Внутренний диаметр волновода $2a = 2,4 \text{ см}$.

4. КБВ в фидере рупорного облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом равен $0,75$. Во сколько раз нужно увеличить фокусное расстояние антенны, чтобы получить КБВ = $0,9$?

5. Определить сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов, если $R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 2} = 73 \text{ Ом}$; $X_{\Sigma 2} = 30 \text{ Ом}$; $X_{H2} = 0$; $d = 0,1\lambda$.

Вариант № 20

1. Нормированные парциальные ДН передающей антенны эллиптической поляризации описываются выражениями $F_\theta(\theta, \varphi) = F_\varphi(\theta, \varphi) = F(\theta) = 0,5(1 + \cos^2 \theta)$. Параметры поляризационного эллипса: $K_\Sigma = 0,9$; $\gamma_\Sigma = \pi/3$ рад. Определить парциальные КНД для компонент поля E_θ и E_φ , а также результирующий КНД антенны.

2. Симметричный вибратор длиной $2l = 0,04$ м на частоте 300 МГц возбуждается переменной ЭДС. Амплитуда тока на входе вибратора равна 1 А. Определить амплитуду напряженности электрического поля вибратора в точке, расположенной в его экваториальной плоскости на расстоянии 1000 м от центра вибратора. Какой будет амплитуда напряженности электрического поля в этой точке для вибратора длиной $2l = 0,12$ м?

3. Определить максимальный КНД H -плоскостного секториального рупора оптимальных размеров, который, имея $a_p = 60$ см и $b_p = 6,4$ см, принимает волны длиной $\lambda = 20$ см.

4. Максимальный КНД зонированной металлопластинчатой линзы, работающей на волне длиной $\lambda = 6$ см, равен $D_0 = 500$. Определить ширину полосы рабочих частот линзы, если известно, что она имеет коэффициент преломления $n = 0,6$. Диаметр раскрытия и фокусное расстояние линзы одинаковы ($d_p = f_a$).

5. Сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов, равно $R_{\Sigma C} = 50$ Ом. Известно, что ток в пассивном вибраторе по фазе опережает ток в активном вибраторе на угол $\Delta\Phi = 2$ рад. Во сколько раз амплитуда тока в пассивном вибраторе меньше амплитуды тока в активном вибраторе, если расстояние между вибраторами $d = 0,15\lambda$?

Вариант № 21

1. Нормированные амплитудные ДН передающей антенны в главных плоскостях описываются выражениями $F(\theta^E) = \cos \theta^E$, $F(\theta^H) = \cos^2 \theta^H$. Определить КНД антенны.

2. Полуволновой вибратор излучает мощность, равную 100 кВт. Определить амплитуду напряженности электрического поля вибратора в его экваториальной плоскости на расстоянии 100 км.

3. Определить в плоскостях E и H ширину ДН (в радианах) H -плоскостного секториального рупора оптимальных размеров ($a_p = 60$ см, $b_p = 6,4$ см), который принимает волны длиной $\lambda = 20$ см.

4. Определить диаметр раскрытия $2a_p$ и фокусное расстояние f_a зеркальной антенны в виде параболоида вращения. В качестве облучателя используется полуволновой симметричный вибратор с дисковым контррефлек-

тором. Длина волны $\lambda = 10$ см, требуемая ширина ДН в плоскости H должна быть равна 2° . Рассчитать ширину ДН (в градусах) в плоскости E .

5. Два одинаковых симметричных вибратора длиной $2l = 0,8\lambda$ расположены параллельно друг другу на расстоянии $d = 0,25\lambda$. Вибраторы возбуждаются токами, амплитуды которых на входе вибраторов одинаковы и равны 1 А, а сдвиг по фазе между ними составляет $\Delta\Phi = \pi/2$ (возбуждение в квадратуре). Определить амплитуды напряженности электрического поля: а) в точке, находящейся в плоскости расположения вибраторов на оси системы и на расстоянии $r = 1000$ м от ее центра; б) в точке, находящейся в плоскости, ортогональной плоскости расположения вибраторов, на второй оси системы и на расстоянии $r = 1000$ м от ее центра.

Вариант № 22

1. Максимальный КНД передающей антенны составляет $D_0 = 1000$. Ширина ДН на уровне 0,5 по мощности в плоскости E равна $2\theta_{0,5}^E = 200$ мрад, Чему равна ширина ДН на этом уровне в плоскости H ?

2. Рассчитать ЭДС, наводимую в полуволновом электрическом вибраторе электромагнитной волной, для двух случаев:

а) полуволновой вибратор установлен в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, параллельно вектору электрического поля линейно поляризованной волны;

б) полуволновой вибратор расположен в плоскости, перпендикулярной направлению волны, под углом 60° к плоскости поляризации линейно поляризованной волны.

Длина волны $\lambda = 4$ м, напряженность поля в точке приема $E = 300$ мкВ/м.

3. Определить ширину ДН (в радианах) в H - и E -плоскостях и максимальный КНД оптимального H -плоскостного секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на волне длиной $\lambda = 3,2$ см. Длина рупора $L_{онт}^H = 25$ см. Размеры горловины рупора: $a = 2,3$ см, $b = 1$ см.

4. Оптимальная зеркальная антенна в виде параболоида вращения, облучаемого диполем с дисковым контррефлектором, на длине волны $\lambda = 3,2$ см должна иметь среднюю ширину ДН не более 1° . Определить диаметр раскрытия $2a_p$ и фокусное расстояние f_a параболоида.

5. Два синфазных симметричных вибратора расположены параллельно друг другу на расстоянии $d = \lambda$ так, что их экваториальные плоскости совпадают. Определить углы, соответствующие тем направлениям в общей экваториальной плоскости вибраторов, в которых их суммарное поле излучения: а) равно нулю; б) имеет максимальное значение. Определить максимальную амплитуду напряженности электрического поля вибраторов на расстоянии $r = 1000$ м от их середины для случая, когда длины вибраторов одинаковы $2l = 4\lambda/5$, а амплитуды токов на входе равны 1 А.

Вариант № 23

1. Максимальная частота рабочего диапазона передающей антенны $f_{\max} = 10 \text{ МГц}$, а минимальная $f_{\min} = 6 \text{ МГц}$. Чему равны относительная ширина полосы рабочих частот (в процентах) и коэффициент перекрытия диапазона?

2. Симметричный горизонтальный полуволновой вибратор, расположенный на некоторой высоте над поверхностью земли, используется для приема радиоволн длиной 30 м . Для обеспечения максимальной дальности приема угол наклона к поверхности земли главного лепестка диаграммы направленности должен быть равен 25° . Определить высоту подвеса вибратора над землей, считая землю плоской и идеально проводящей.

3. Оптимальный H -плоскостной секториальный рупор длиной $L_{\text{опт}}^H = 90 \text{ см}$ имеет максимальный КНД $D_0 = 25$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) на уровне $0,5$ по мощности в плоскостях H и E , если один из размеров рупора в раскрытие равен $b_p = 3,4 \text{ см}$.

4. КБВ в фидере рупорного облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом равен $0,75$. Во сколько раз нужно увеличить фокусное расстояние антенны, чтобы КБВ стал равным $0,9$?

5. Два синфазных симметричных полуволновых вибратора расположены параллельно друг другу на расстоянии $d = \lambda/2$ и имеют общую экваториальную плоскость. Определить углы, соответствующие направлениям максимального излучения вибраторов в общей меридиональной плоскости. Определить максимальную амплитуду напряженности суммарного электрического поля излучения вибраторов на расстоянии $r = 1 \text{ 000 м}$ от них, считая амплитуды токов на их входных зажимах равными 2 А .

Вариант № 24

1. Для измерения диаграммы направленности параболоида вращения с диаметром раскрытия $d_p = 1,5 \text{ м}$ используется вспомогательная антенна, работающая в режиме передачи и имеющая малые по сравнению с исследуемой антенной размеры. Каким должно быть минимальное расстояние между антеннами, чтобы максимальные фазовые искажения не превосходили $\pi/8$? Длина волны генератора $\lambda = 5 \text{ см}$.

2. Определить, под каким углом Δ к горизонту следует расположить полуволновой горизонтальный вибратор, находящийся на высоте $h = 2\lambda$ над плоской идеально проводящей землей, чтобы обеспечить максимальное значение напряженности электрического поля в направлении горизонта.

3. Определить размеры оптимального H -секториального рупора, обеспечивающего получение в плоскости H диаграммы направленности шириной 20° , если длина волны равна 3 см , а передача энергии от генератора к рупору осуществляется стандартным волноводом $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

4. Рассчитать, на какое расстояние необходимо вынести из фокуса параболоида вращения ($d_p = 3,5 \text{ м}$; $f_a = 2,1 \text{ м}$) фазовый центр облучателя, для того, чтобы направление главного максимума ДН антенны составляло с фокальной осью угол, равный ширине ДН на уровне 0,5 по мощности в плоскости E . Длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$.

5. При какой разности фаз $\Delta\Phi$ между токами соседних излучателей линейной равноамплитудной решетки, состоящей из $N = 14$ изотропных излучателей, главный максимум излучения сместится на угол $\delta\theta = \pi/6$ рад относительно нормали к линии расположения излучателей, если ширина ДН антенны $2\theta_{0,5} = 89 \text{ мрад}$?

Вариант № 25

1. На какое расстояние необходимо удалить приемную антенну (пирамидальный рупор с раскрывом $15 \times 30 \text{ см}^2$) при измерении диаграммы направленности параболической антенны с диаметром раскрыва $d_p = 0,5 \text{ м}$. Длина волны генератора $\lambda = 3 \text{ см}$. Максимальные фазовые искажения не должны превышать $\pi/8$.

2. Симметричный вибратор длиной $2l = 3\lambda/2$ расположен вертикально на высоте $h = \lambda$ над поверхностью земли. Считая землю плоской и идеально проводящей, определить амплитуду напряженности электрического поля в точке, расположенной в непосредственной близости от земли на расстоянии 1000 м от вибратора, если известно, что амплитуда тока на входе вибратора равна 1 А .

3. Определить ширину ДН в плоскости H (в градусах) и КНД в направлении максимума излучения для H -секториального рупора с размерами: $L^H = 200 \text{ мм}$, $a_p = 70 \text{ мм}$. Длина волны $\lambda = 3,2 \text{ см}$, возбуждение осуществляется стандартным волноводом сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

4. Фазовый центр облучателя параболоида вращения, радиус раскрыва которого равен $a_p = 1,5 \text{ м}$, а фокусное расстояние составляет $f_a = 1,25 \text{ м}$, вынесен из фокуса в направлении, перпендикулярном оси зеркала, на расстояние $\Delta x = 6 \text{ см}$. Определить угол отклонения (в градусах) максимума ДН от оси антенны.

5. Рассчитать сопротивление излучения трех полуволновых синфазных вибраторов, расположенных без сдвига по оси параллельно друг другу на расстоянии полволны.

Вариант № 26

1. Определить максимальную ЭДС, возбуждаемую в приемной антенне электромагнитной волной длиной $\lambda = 49 \text{ м}$ с напряженностью электрического поля $E = 10 \text{ мкВ/м}$ при условии, что антенна имеет КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 50$, а ее сопротивление излучения равно $R_\Sigma = 1200 \text{ Ом}$.

2. Определить входное сопротивление симметричного полуволнового вибратора, подвешенного над идеально проводящей землей в одном случае горизонтально, в другом – вертикально. Расстояние от поверхности земли до центра вибратора 5 м. Длина волны 20 м.

3. Определить ширину ДН в плоскости H (в градусах) и КНД в направлении максимума излучения для H -секториального рупора с размерами: $L^H = 200$ мм, $a_p = 140$ мм. Длина волны $\lambda = 3,2$ см, возбуждение осуществляется стандартным волноводом сечением 23×10 мм².

4. Рассчитать, на какое расстояние необходимо вынести из фокуса параболоида вращения фазовый центр облучателя, для того чтобы направление максимума излучения антенны составляло с фокальной осью угол, равный ширине диаграммы направленности антенны. Радиус раскрытия параболоида $a_p = 175$ см, фокусное расстояние $f_a = 110$ см, длина волны $\lambda = 10$ см.

5. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = 0,4\lambda$) решетки, состоящей из $N = 3$ синфазных полуволновых вибраторов.

Вариант № 27

1. Мощность, отдаваемая приемной антенной в несогласованную нагрузку, $P = 1$ мВт. Активное сопротивление антенны $R_{ex} = 300$ Ом, а возбуждаемая в ней ЭДС равна $\mathcal{E} = 400$ мВ. Определить коэффициент согласования антенны с нагрузкой γ . Потерями пренебречь.

2. Определить эффективную длину, отнесенную к току в точках питания, вертикальной заземленной антенны высотой $l = \lambda/2 = 25$ м. Волновое сопротивление антенны равно 500 Ом.

3. Определить ширину ДН в плоскости H (в градусах) и КНД в направлении максимума излучения для H -секториального рупора с размерами: $L^H = 550$ мм, $a_p = 230$ мм. Длина волны $\lambda = 3,2$ см, возбуждение осуществляется стандартным волноводом сечением 23×10 мм².

4. Определить допустимое смещение из фокуса вдоль оси параболоида вращения фазового центра облучателя для того, чтобы фазовые искажения поля в раскрытии параболоида за счет неточности установки облучателя не превосходили $\pi/4$. Длина волны $\lambda = 3$ см, а отношение радиуса раскрытия к двойному фокусному расстоянию параболоида $a_p/2f = 1$. Каково будет допустимое смещение фазового центра облучателя, если при прочих равных условиях принять $a_p/2f_a = 0,6$?

5. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = \lambda/2$) антенной решетки, состоящей из $N = 4$ синфазных продольных полуволновых вибраторов и настроенного рефлектора, при расстоянии между вибраторами и рефлектором, равном $\lambda/2$.

Вариант № 28

1. Определить мощность, отдаваемую приемной антенной в несогласованную нагрузку, если коэффициент согласования $\gamma = 0,6$, а напряженность электрического поля в точке приема $E = 400 \text{ мкВ/м}$. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 3 \text{ м}$ и имеет максимальный КНД $D_0 = 25$.

2. Чему равно сопротивление излучения вертикальной заземленной антенны высотой 5 м на волне длиной 20 м ?

3. Определить размеры оптимального прямоугольного E -секториального рупора, обеспечивающего получение в плоскости H диаграммы направленности шириной 20° , если длина волны равна 3 см , а передача энергии от генератора к рупору осуществляется стандартным волноводом размером $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

4. Определить, какое максимальное отклонение профиля параболоида вращения допустимо, если фазовые искажения поля в раскрыве антенны не должны превышать $\pi/8$. Длина волны равна $\lambda = 3,2 \text{ см}$.

5. Определить ширину ДН (в радианах) на уровне $0,5$ по мощности в плоскости H директорной антенны, эффективная площадь которой равна $S_{\text{эф}} = 9 \text{ м}^2$. Длина рабочей волны $\lambda = 3 \text{ м}$.

Вариант № 29

1. Эффективная площадь приемной антенны $S_{\text{эф}} = 3,6 \text{ м}^2$. Определить максимальную мощность, отдаваемую антенной в согласованную нагрузку, если напряженность электрического поля в точке приема равна $E = 150 \text{ мкВ/м}$.

2. Несимметричная вертикальная заземленная антенна радиомаяка имеет высоту $l = 20 \text{ м}$. Определить действующую высоту антенны при работе на волнах длиной: а) 60 м ; б) 80 м ; в) 540 м .

3. Определить оптимальную длину $L_{\text{онт}}^E$ и размер b_p раскрыва E -плоскостного секториального рупора, который, имея $a_p = 3,55 \text{ см}$, на волне длиной $\lambda = 5 \text{ см}$ обеспечивает КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 25$.

4. Определить диаметр плоского компенсирующего отражателя, устанавливаемого у вершины параболоида с фокусным расстоянием $f_a = 37 \text{ см}$, если длина рабочей волны $\lambda = 12 \text{ см}$. Чему равно минимальное удаление отражателя от вершины параболоида?

5. Ширина ДН на уровне $0,5$ по мощности директорной антенны в плоскости H составляет $2\theta_{0,5}^H = 0,35 \text{ рад}$. На какой частоте работает антенна, если ее эффективная площадь $S_{\text{эф}} = 5,5 \text{ м}^2$?

Вариант № 30

1. Во сколько раз максимальная мощность полезного сигнала на выходе приемной антенны будет меньше мощности сигнала, излучаемого пере-

дающей антенной, если расстояние между антеннами $r = 10$ км, длина рабочей волны $\lambda = 30$ см, а КУ антенн одинаковы $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 1\,000$?

2. Несимметричная вертикальная заземленная антенна имеет высоту $l = 50$ м. Сопротивление излучения антенны, отнесенное к максимуму тока, $R_{\Sigma \text{max}} = 100$ Ом. Определить действующую высоту антенны.

3. Определить в плоскостях E и H ширину ДН (в градусах) E -плоскостного секториального рупора, который с размером $a_p = 3,55$ см на волне длиной $\lambda = 5$ см имеет максимальный КНД $D_0 = 25$.

4. Диаметр плоского компенсирующего отражателя, установленного на расстоянии 1 см от вершины параболоида, равен 66 см. Определить фокусное расстояние, диаметр и полный угол раскрытия параболоида (в радианах), а также в главных плоскостях ширину ДН антенны (в радианах) и максимальный КНД, если $f_a = 0,5 d_p$.

5. Определить эффективную площадь и ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскости E директорной антенны с $N = 15$ вибраторами при работе на волне длиной $\lambda = 3$ м. Ширина ДН антенны в плоскости H составляет $2\theta_{0,5}^H = 0,525$ рад.

Вариант № 31

1. Определить эффективную длину, отнесенную к току на входе, симметричного вибратора длиной: а) $2l = \lambda/4$; б) $2l = \lambda/2$; в) $2l = 5\lambda/8$.

2. Определить действующую высоту и сопротивление излучения, отнесенное к максимуму распределения тока и к току у основания несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $l = 150$ м, работающего на волне длиной $\lambda = 250$ м.

3. Оптимальный E -плоскостной секториальный рупор длиной $L_{\text{opt}}^E = 80$ см имеет максимальное значение КНД $D_0 = 40$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E , если один из размеров рупора в раскрытии равен $a_p = 2,3$ см.

4. Антенна самолетного радиолокатора, работающего на волне длиной $\lambda = 3$ см, выполнена в виде усеченного параболоида вращения с размерами $d_p = 1,5$ м, $a_p = 1$ м. Определить в плоскостях H и E ширину ДН антенны (в радианах) на уровне 0,5 по мощности.

5. Определить в главных плоскостях ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности логопериодической антенны, безразмерный период структуры которой $\tau = 0,83$, а угол раскрытия полотна вибраторов $2\beta = \pi/9$ рад.

Вариант № 32

1. Определить эффективную длину, отнесенную к току в максимуме, симметричного волнового вибратора длиной $2l = \lambda = 20$ м.

2. Несимметричная вертикальная заземленная антенна высотой $h = 110$ м работает на частоте $f = 250$ кГц. Определить сопротивление излучения, отнесенное к току у основания антенны.

3. Эффективная поверхность оптимальной E -плоскостной секториальной рупорной антенны составляет $S_{эф} = 180$ см². Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД при работе на волне длиной $\lambda = 6$ см, если один из размеров рупора в раскрытие равен $a_p = 5,8$ см.

4. Определить размеры раскрытия зеркала в виде усеченного параболоида вращения, при которых антенна будет иметь в главных плоскостях ширину ДН на уровне 0,5 по мощности $2\theta_{0,5}^E = 122$ мрад и $2\theta_{0,5}^H = 17,5$ мрад. Длина волны $\lambda = 3$ см.

5. Логопериодическая антенна, безразмерный период структуры которой $\tau = 0,95$, в плоскости E имеет ширину ДН на уровне 0,5 по мощности $2\theta_{0,5}^E = 0,875$ рад. Определить угол раскрытия полотна вибраторов антенны.

Вариант № 33

1. Определить напряжение U_n на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 100$ мкВ/м, а длина волны $\lambda = 30$ м. Входное сопротивление приемника $R_n = 200$ Ом. Потерями в антенне пренебречь.

2. Антенна выполнена в виде вертикального провода диаметром 5 мм и длиной 50 м. Рассчитать эффективную длину, сопротивление излучения и КПД антенны на волне длиной 400 м. Сопротивление потерь принять равным 10 Ом.

3. Каким должно быть соотношение сторон оптимального пирамидального рупора, возбуждаемого волноводом с волной типа H_{10} , чтобы ширина диаграммы направленности в плоскостях E и H была одинаковой?

4. Ширина ДН двухзеркальной антенны Кассегрена, работающей на волне длиной $\lambda = 6$ см, составляет $2\theta_{0,5} = 36$ мрад. Угол раскрытия малого зеркала равен $\pi/6$ рад. Определить диаметры и фокусные расстояния зеркал.

5. Логопериодическая антенна, угол раскрытия полотна вибраторов которой $2\beta = \pi/4$ рад, в плоскости H имеет ширину ДН на уровне 0,5 по мощности $2\theta_{0,5}^H = 2,1$ рад. Чему равно отношение размеров плеч соседних вибраторов в антенне?

Вариант № 34

1. Определить напряжение на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору длиной 10 м. Напряженность электрического поля в точке приема равна 5 мкВ/м. Входное сопротивление

приемника составляет 100 Ом . Сопротивление потерь в антенне равно 10 Ом .

2. Несимметричная вертикальная заземленная антенна имеет высоту $l = 200 \text{ м}$ и работает на волне длиной $\lambda = 1400 \text{ м}$. Амперметр у основания антенны показывает силу тока $I = 45 \text{ А}$. Определить мощность, излучаемую антенной. Потери не учитывать.

3. Пирамидальный рупор возбуждается волной типа H_{10} прямоугольного волновода. Длина рупора составляет 21 см , размер апертуры $116 \times 116 \text{ мм}^2$. Определить в плоскостях E и H ширину ДН (в градусах), если рабочая длина волны равна $\lambda = 3,2 \text{ см}$.

4. Параболический цилиндр, размер раскрыва которого $d_p = 0,5 \text{ м}$, а длина образующей $a_p = 1,5 \text{ м}$, на волне длиной $\lambda = 3 \text{ см}$ возбуждается облучателем с синфазным равноамплитудным распределением поля. Определить ширину ДН на уровне $0,5$ по мощности в плоскостях H и E и максимальный КНД антенны.

5. Записать выражение для нормированной амплитудной ДН в продольной плоскости синфазной волноводной щелевой антенной решетки, состоящей из $N = 16$ поперечных щелей, прорезанных в широкой стенке волновода с размером $a = 1,7 \text{ см}$, если длина волны в волноводе $\lambda_g = 3,7 \text{ см}$.

Вариант № 35

1. Определить напряжение на входе приемника, подключенного к симметричному полуволновому вибратору, если входное сопротивление приемника равно 200 Ом , а напряженность поля в точке приема составляет 100 мкВ/м . Длина волны равна 20 м . Потерями пренебречь.

2. Несимметричный вертикальный заземленный четвертьволновый вибратор имеет высоту $l = 30 \text{ м}$ и волновое сопротивление $w_g = 510 \text{ Ом}$. Определить амплитуды тока и напряжения в вибраторе на расстоянии 20 м от его конца, если напряжение на конце антенны равно $U = 5 \text{ кВ}$.

3. Пирамидальный рупор оптимальных размеров длиной $L_{opt} = 36 \text{ см}$ рассчитан для работы на волне $\lambda = 9 \text{ см}$. Определить размеры раскрыва a_p , b_p и максимальный КНД антенны.

4. Определить относительные размеры (диаметр d_p / λ , длина образующей a_p / λ) параболического цилиндра, облучаемого линейным источником с синфазным равноамплитудным распределением тока. Антенна в главных плоскостях должна иметь ширину ДН на уровне $0,5$ по мощности $2\theta_{0,5}^d = 122 \text{ мрад}$, $2\theta_{0,5}^a = 35 \text{ мрад}$.

5. Определить максимальный КНД волноводной щелевой антенной решетки, состоящей из шести синфазных полуволновых щелей.

Вариант № 36

1. Приемный полуволновой вибратор без потерь работает на волне длиной $\lambda = 1 \text{ м}$ и ориентирован на максимум приходящей волны. Определить мощность, которая выделяется в согласованной нагрузке вибратора, если известно, что амплитуда напряженности электрического поля в месте приема равна 1 мВ/м .

2. Определить волновое сопротивление несимметричного вертикально-го заземленного вибратора высотой $l = 120 \text{ м}$, выполненного из провода диаметром $2a = 8 \text{ мм}$.

3. Пирамидальный рупор оптимальных размеров длиной $L_{opt} = 36 \text{ см}$ рассчитан на работу на волне $\lambda = 9 \text{ см}$. Определить в плоскостях E и H ширину ДН (в градусах).

4. Определить максимальный КНД зеркальной антенны с параболическим цилиндром, диаметр раскрыва которого $d_p = 25 \text{ см}$, длина образующей $a_p = 50 \text{ см}$, длина волны $\lambda = 2 \text{ см}$.

5. Определить максимальный КНД синфазной волноводной щелевой антенной решетки, в которой имеется восемь щелей.

Вариант № 37

1. Приемная антенна имеет параметры: $l_{эф} = 1,4 \text{ м}$; $R_{\Sigma} = 75 \text{ Ом}$. Определить максимальную мощность, отдаваемую антенной в согласованную нагрузку, если напряженность электрического поля в точке приема равна $E = 200 \text{ мкВ/м}$.

2. Определить входное сопротивление вертикальной заземленной антенны, имеющей высоту, равную половине длины волны. Волновое сопротивление антенны 400 Ом .

3. Определить размеры раскрыва оптимального рупора, максимальный КНД которого равен 30, если ширина ДН в плоскостях E и H одинакова, а длина волны составляет 3 см . Возбуждение осуществляется стандартным волноводом размером $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

4. Определить КБВ в фидере облучателя антенны с зеркалом в виде параболического цилиндра, работающей на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$, если КНД облучателя $D_{обл} = 5$, а фокусное расстояние зеркала $f_a = 16 \text{ см}$.

5. Максимальный КНД синфазной волноводной щелевой антенной решетки $D_0 = 48$. Сколько щелей имеет антенна?

Вариант № 38

1. Определить максимальную мощность, которую может отдать в согласованную нагрузку приемный полуволновой вибратор длиной $2l = 10 \text{ м}$ при напряженности электрического поля в точке приема $E = 100 \text{ мкВ/м}$. Найти эффективную площадь этого вибратора, пренебрегая потерями.

2. Определить активную и реактивную составляющие входного сопротивления, а также КПД несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $l = 135$ м, работающего на волне длиной 700 м. Радиус вибратора $a = 5$ мм, сопротивление активных потерь $R_{\text{п}} = 4,6$ Ом.

3. Оптимальный пирамидальный рупор с квадратным раскрывом возбуждается волной типа H_{10} прямоугольного волновода. В какой из плоскостей (H или E) и во сколько раз ширина ДН рупора на уровне 0,5 по мощности будет больше?

4. КБВ в фидере облучателя зеркальной антенны с параболическим цилиндром равен 0,6. Во сколько раз нужно увеличить фокусное расстояние антенны, чтобы КБВ стал равным 0,72?

5. Определить эквивалентную нормированную проводимость продольной полуволновой щели, прорезанной в широкой стенке волновода сечением $a \times b = 2,85 \times 1,26$ см и смещенной на расстояние $x_1 = 0,5$ см от оси волновода, если длина волны генератора равна $\lambda = 3,2$ см.

Вариант № 39

1. Определить эффективную площадь симметричного приемного вибратора без потерь, длина которого $2l = 0,75\lambda$. Во сколько раз эта площадь больше эффективной площади приемного полуволнового вибратора?

2. Определить входное сопротивление несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $h = 120$ м, выполненного из провода диаметром $2a = 8$ мм и работающего на волне длиной $\lambda = 500$ м. Сопротивлением активных потерь в антенне пренебречь.

3. Оптимальный пирамидальный рупор возбуждается волной типа H_{10} прямоугольного волновода и имеет раскрыв $a_p \times b_p = 11,6 \times 11,6$ см². Определить ширину ДН рупора (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E , если рабочая длина волны $\lambda = 3,2$ см.

4. Определить толщину и угол раскрыва (в радианах) гладкой диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n = 1,6$) и рассчитанной для работы на волне длиной $\lambda = 3,2$ см, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы $d_p = f_a = 15 \lambda$. Как изменится толщина линзы, если ее сделать зонированной? Величину утолщения линзы принять равной $z_2 = 1$ см.

5. Эквивалентная нормированная проводимость продольной полуволновой щели, расположенной на расстоянии $x_1 = 1$ см от оси волновода, $\overline{G}_1 = 0,3$. На какое расстояние x_1 (в см) от оси волновода следует сместить щель, чтобы эквивалентная нормированная проводимость стала $\overline{G}_1 = 0,2$? Размеры волновода: $a = 7,2$ см; $b = 3,4$ см.

Вариант № 40

1. Определить параметры поляризаационного эллипса передающей антенны, если отношение амплитуд ортогональных компонент излучаемого поля $m = 0,7$; разность их фаз $\psi = \pi/4$ радиан.

2. Два симметричных полуволновых вибратора без потерь расположены на расстоянии $r = 1\ 000\ м$ так, что их оси параллельны друг другу и перпендикулярны прямой, проходящей через центры вибраторов. Один из вибраторов работает в режиме передачи, другой – в режиме приема. Длина волны генератора $\lambda = 1\ м$. Определить мощность, выделяемую в согласованной нагрузке приемного вибратора, если известно, что амплитуда тока на входе передающего вибратора равна $1\ А$. Найти также эффективную высоту приемного вибратора и амплитуду ЭДС, наведенной в этом вибраторе электромагнитной волной, излучаемой передающим вибратором.

3. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и КНД оптимального E -плоскостного секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на волне длиной $\lambda = 9\ см$. Длина рупора $L_{opt}^E = 80\ см$. Размеры волновода: $a = 7,2\ см$, $b = 3,4\ см$.

4. Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, работающей на волне длиной $\lambda = 2\ см$ и имеющей КНД $D_0 = 10\ 000$. Угол раскрыва зеркала $2\psi_p = 1,6\ рад$.

5. Сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволнового активного и полуволнового пассивного вибраторов, равно $R_{\Sigma C} = 50\ Ом$. Известно, что ток в пассивном вибраторе опережает по фазе ток в активном вибраторе на угол $\Delta\Phi = 2\ рад$. Во сколько раз амплитуда тока в пассивном вибраторе меньше амплитуды тока в активном вибраторе, если расстояние между вибраторами $d = 0,15\lambda$?

Вариант № 41

1. Нормированные амплитудные ДН передающей антенны в главных плоскостях описываются выражениями $\bar{F}(\theta^E) = \cos\theta^E$, $\bar{F}(\theta^H) = \cos^2\theta^H$. Определить КНД антенны.

2. Определить эффективную длину и сопротивление излучения в точке питания и в максимуме тока симметричного вибратора при его относительной длине $2l/\lambda$, равной: а) $3/20$; б) $1/4$; в) $1/2$.

3. Оптимальная пирамидальная рупорная антенна имеет КНД $D_0 = 1\ 000$ при длине $L_{opt} = 1,21\ м$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН (в радианах) в плоскостях H и E .

4. Рассчитать, на какое расстояние необходимо вынести из фокуса параболоида вращения ($d_p = 3,5\ м$; $f = 2,1\ м$) фазовый центр облучателя для того, чтобы направление главного максимума амплитудной ДН антенны со-

ставляло с фокальной осью угол $\delta\theta = 2\theta_{0,5}^E$, где $2\theta_{0,5}^E$ – ширина ДН антенны на уровне 0,5 по мощности в плоскости E . Длина волны $\lambda = 10$ см.

5. Определить коэффициент направленного действия двух синфазных полуволновых вибраторов, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $d = 0,5\lambda$ и имеющих общую экваториальную плоскость.

Вариант № 42

1. Максимальная частота рабочего диапазона антенны $f_{\max} = 10$ МГц, а минимальная $f_{\min} = 6$ МГц. Чему равны относительная ширина полосы рабочих частот (в процентах) и коэффициент перекрытия диапазона?

2. Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $2l = 2$ м, работающего на волне длиной $\lambda = 5$ м, если его волновое сопротивление $w_\epsilon = 360$ Ом.

3. Эффективная поверхность оптимальной пирамидальной рупорной антенны $S_{эф} = 1$ м². Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и КНД антенны при работе на частоте $f = 3$ ГГц.

4. Определить толщину и половину угла раскрыва (в радианах) диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n = 1,6$) и рассчитанной для работы на волне длиной $\lambda = 3,2$ см, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы: $d_p = f = 15 \lambda$.

5. Определить сопротивление излучения симметричного волнового вибратора, отнесенное к его току в максимуме, рассматривая этот вибратор как систему, состоящую из двух связанных полуволновых вибраторов.

Вариант № 43

1. Определить ЭДС, возбуждаемую в круглой рамочной антенне. Антенна расположена под углом $\theta = (\pi/9)$ радиан к направлению на передатчик, работающий на волне $\lambda = 100$ м и создающий напряженность электрического поля в точке приема $E = 480$ мкВ/м. Параметры антенны: $G_0 = 1,5$; $R_{ex} = 5$ Ом; $\bar{F}(\theta) = \sin \theta$. Плоскости поляризации приемной и передающей антенн совпадают.

2. Определить величину и характер реактивной составляющей входного сопротивления симметричного вибратора, имеющего длину $2l = 3$ м и волновое сопротивление $w_\epsilon = 400$ Ом. Частота генератора $f = 75$ МГц.

3. Оптимальный конический рупор, работающий на частоте $f = 6$ ГГц, имеет диаметр раскрыва $2a_p = 20$ см. Какого диаметра нужно взять раскрыв рупора и на сколько сантиметров при этом следует удлинить рупор, чтобы увеличить его КНД в два раза?

4. Определить толщину и половину угла раскрыва (в радианах) металлопластинчатой линзы при расстоянии между пластинами $a = 6$ см, длине волны $\lambda = 10$ см и размерах линзы $d_p = f = 1,5$ м.

5. Определить угол (в радианах), на который смещается главный максимум излучения линейной равноамплитудной эквидистантной решетки, состоящей из $N = 17$ изотропных излучателей, при разности фаз между токами соседних излучателей $\Delta\Phi = \pi/4$ и ширине ДН антенны $2\theta_{0,5} = 0,21 \text{ рад}$.

Вариант № 44

1. Определить максимальную ЭДС, возбуждаемую в приемной антенне электромагнитной волной длиной $\lambda = 49 \text{ м}$, имеющей в точке приема напряженность электрического поля $E = 10 \text{ мкВ/м}$, при условии, что антенна имеет максимальный КНД $D_0 = 50$, а ее сопротивление излучения $R_\Sigma = 1200 \text{ Ом}$.

2. Симметричный вибратор имеет размеры: длина $2l = 18 \text{ см}$, диаметр $2a = 12 \text{ мм}$. Определить величину и характер реактивной составляющей входного сопротивления вибратора на частоте $f = 750 \text{ МГц}$.

3. Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, ширина ДН которой в плоскости H равна $2\theta_{0,5}^H = 17,5 \text{ мрад}$. Длина рабочей волны $\lambda = 3,2 \text{ см}$, а половина угла раскрыва зеркала $\psi_p = 0,86 \text{ рад}$.

4. Определить толщину, половину угла раскрыва (в радианах) и КУ диэлектрической линзы ($n = 1,5$; $\text{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-4}$), работающей на волне длиной $\lambda = 5 \text{ см}$, если раскрыв линзы имеет форму круга диаметром $d_p = 20 \lambda$, а фокусное расстояние линзы $f_a = d_p$. Рассчитать технические допуски на точность изготовления такой антенны.

5. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = \lambda/2$) антенной решетки, состоящей из $N = 4$ синфазных полуволновых вибраторов и настроенного рефлектора. Расстояние между всеми вибраторами, включая рефлектор, составляет $\lambda/2$.

Вариант № 45

1. Приемная антенна имеет параметры: $l_{эф} = 1,4 \text{ м}$; $R_{ex} = 75 \text{ Ом}$. Определить максимальную мощность, отдаваемую антенной в согласованную нагрузку, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 200 \text{ мкВ/м}$.

2. Входное сопротивление симметричного волнового вибратора $R_{ex} = 3,2 \text{ кОм}$. Определить диаметр вибратора, если частота генератора $f = 75 \text{ МГц}$.

3. Облучатель параболической антенны с осесимметричным зеркалом, фокусное расстояние которого равно радиусу зеркала и составляет 50 см , смещен в направлении, перпендикулярном фокальной оси, на расстояние $\Delta x = 6 \text{ см}$. Облучатель вращается вокруг оси зеркала. Определить угловое смещение (в радианах) максимума ДН антенны.

4. Определить КБВ в фидере и максимальный КНД металлопластинчатой линзы, расстояние между пластинами которой $a = 1,5 \text{ см}$, длина волны $\lambda = 2 \text{ см}$, а параметры линзы $d_p = f_a = 40 \text{ см}$.

5. Определить сопротивление излучения линейной эквидистантной ($d = \lambda/2$) антенной решетки, состоящей из $N = 3$ синфазных полуволновых элементов: двух вибраторов и настроенного рефлектора. Расстояние между вибраторами, а также рефлектором равно $\lambda/2$.

Вариант № 46

1. Определить мощность, отдаваемую приемной антенной в несогласованную по поляризации нагрузку ($\chi = 0,6 \text{ рад}$) при напряженности электрического поля в точке приема $E = 400 \text{ мкВ/м}$. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 3 \text{ м}$ и имеет КУ $G_0 = 25$.

2. Определить резонансную длину симметричного полуволнового вибратора, имеющего диаметр $2a = 10 \text{ мм}$ и работающего на частоте $f = 150 \text{ МГц}$.

3. Определить КУ и КПД гладкой диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n = 1,6$; $\text{tg} \delta = 7 \cdot 10^{-4}$) и работающей на частоте $f = 15 \text{ ГГц}$, если диаметр раскрытия и фокусное расстояние линзы одинаковы и равны $d_p = f_a = 26 \text{ см}$.

4. Определить толщину и фокусное расстояние полистироловой ($n = 1,6$) линзы, с помощью которой может быть сформирован плоский фазовый фронт в раскрытии оптимального конического рупора диаметром $d_p = 72 \text{ см}$, работающего на волне длиной $\lambda = 8 \text{ см}$. Определить также КНД рупора с линзой и без нее, считая, что характер изменения амплитуды поля в раскрытии линзы такой же, как и в раскрытии рупора без линзы.

5. Определить ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскости H директорной антенны, эффективная площадь которой $S_{\text{эф}} = 9 \text{ м}^2$. Длина волны $\lambda = 3 \text{ м}$.

Вариант № 47

1. Эффективная площадь приемной антенны $S_{\text{эф}} = 3,6 \text{ м}^2$. Определить максимальную мощность, отдаваемую антенной в согласованную нагрузку, если напряженность электрического поля в точке приема $E = 150 \text{ мкВ/м}$.

2. Волновое сопротивление симметричного полуволнового вибратора $w_e = 600 \text{ Ом}$. Определить резонансную длину вибратора, если его диаметр $2a = 16 \text{ мм}$.

3. Определить толщину, фокусное расстояние и число пластин металлопластинчатой линзы, с помощью которой может быть сформирован плоский фазовый фронт в раскрытии оптимального H -плоскостного секториального рупора, имеющего размеры $a_p \times b = 73 \times 3,4 \text{ см}$. Длина рабочей волны $\lambda = 10 \text{ см}$, показатель преломления линзы $n = 0,55$. Определить также КНД

рупора с линзой и без нее, считая, что характер изменения амплитуды поля в раскрыве линзы такой же, как и в раскрыве рупора без линзы.

4. На какой угол (в радианах) относительно фокальной оси отклоняется главный максимум ДН полиэтиленовой ($n = 1,5$) линзовой антенны при выносе облучателя из фокуса на расстояние $\Delta x = 4$ см в направлении, перпендикулярном ее фокальной оси? Линза имеет $f_a = d_p$.

5. Ширина ДН на уровне 0,5 по мощности в плоскости H директорной антенны $2\theta_{0,5}^H = 0,35$ рад. На какой частоте работает антенна, если ее эффективная площадь $S_{эф} = 5,5$ м²?

Вариант № 48

1. Определить эффективную площадь симметричного приемного вибратора без потерь длиной $2l = 3\lambda/4$. Во сколько раз эта площадь больше действующей площади приемного полуволнового вибратора?

2. Волновое сопротивление симметричного волнового вибратора $w_\nu = 360$ Ом. Определить диаметр вибратора, если его длина $2l = 30$ см. Эффектом укорочения вибратора пренебречь.

3. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и КНД излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода с волной основного типа и сечением $a \times b = 6,1 \times 1$ см, работающего на частоте $f = 5$ ГГц.

4. Главный максимум амплитудной ДН полиэтиленовой ($n = 1,5$) линзовой антенны при выносе облучателя из фокуса в направлении, перпендикулярном ее фокальной оси, на расстояние $\Delta x = 6$ см отклоняется относительно фокальной оси антенны на угол $\delta\theta = 175$ мрад. Определить толщину линзы, если диаметр ее раскрыва и фокусное расстояние одинаковы $d_p = f_a$.

5. Записать выражение для нормированной амплитудной ДН в продольной плоскости синфазной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из $N = 16$ поперечных щелей, прорезанных в широкой стенке прямоугольного волновода, размер которой $a = 1,7$ см. Длина волны в волноводе $\lambda_g = 3,7$ см.

Вариант № 49

1. Во сколько раз максимальная мощность полезного сигнала на выходе приемной антенны будет меньше мощности сигнала, излучаемого передающей антенной, если расстояние между антеннами $r = 10$ км, длина рабочей волны $\lambda = 30$ см, а КУ антенн одинаковы $G_{пер} = G_{пр} = 1\,000$?

2. Определить резонансную длину плоской щелевой полуволновой антенны, работающей на волне длиной $\lambda = 80$ см. Ширина щели b равна: а) 4 см; б) 2 см.

3. Во сколько раз ширина ДН открытого конца прямоугольного волновода на уровне 0,5 по мощности в плоскости E больше ширины ДН на том же

уровне в плоскости H , если размеры сечения волновода связаны соотношением $a = 2b$?

4. Рассчитать и построить в плоскостях E и H нормированные амплитудные ДН антенны, состоящей из двух активных полуволновых вибраторов, питаемых токами с одинаковыми амплитудами и сдвигом фаз $\Delta\Phi = \pi/2$. Расстояние между вибраторами $d = \lambda/2$. Определить сопротивление излучения и КНД антенны.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенная решетка, имеющая $N = 10$ продольных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 8$ см. На какое расстояние следует сместить щели относительно узкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 6,1 \times 1$ см.

Вариант № 50

1. Определить эффективную длину и сопротивление излучения в точке питания и в максимуме тока симметричного вибратора при его относительной длине $2l/\lambda$, равной: а) $3/20$; б) $1/4$; в) $1/2$.

2. Определить входное сопротивление несимметричного вертикального заземленного вибратора, установленного над идеально проводящей землей, при относительной высоте вибратора l/λ , равной: а) $0,125$; б) $0,25$; в) $0,3$; г) $0,5$; д) $0,8$. Волновое сопротивление вибратора $w_g = 500$ Ом.

3. Определить размеры раскрыва оптимального пирамидального рупора, максимальный КНД которого равен $D_0 = 30$. Ширина ДН рупора на уровне $0,5$ по мощности в главных плоскостях одинакова ($2\theta_{0,5}^H = 2\theta_{0,5}^E$), а рабочая длина волны $\lambda = 3$ см.

4. Определить толщину, угол раскрыва (в радианах) и максимальный КУ диэлектрической линзы, изготовленной из тролитула ($n = 1,6$; $tg\delta = 5 \cdot 10^{-3}$) и работающей на волне длиной $\lambda = 5$ см, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы равны $d_p = f_a = 20 \lambda$.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 10$ продольных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 8$ см. На какое расстояние x_1 (в см) следует сместить щели относительно оси волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 6,1 \times 1$ см.

Вариант № 51

1. Определить резонансную длину с учетом укорочения симметричного полуволнового вибратора, имеющего диаметр $2a = 10$ мм и работающего на частоте $f = 150$ МГц.

2. Несимметричный вертикальный заземленный вибратор имеет высоту $l = 100$ м и волновое сопротивление $w_g = 300$ Ом. Активная составляющая входного сопротивления вибратора $R_{ex} = 4,8$ Ом. Рассчитать элемент на-

стройки вибратора (емкость или индуктивность), сопротивление излучения, отнесенное к максимуму тока и к току у основания вибратора, а также КПД при работе на волне длиной $\lambda = 800 \text{ м}$.

3. Определить максимальный КНД и эффективную площадь оптимальной пирамидальной рупорной антенны, работающей на волне длиной $\lambda = 12 \text{ см}$, если размеры раскрыва антенны равны $a_p = 21 \text{ см}$, $b_p = 16 \text{ см}$.

4. Определить толщину и фокусное расстояние полистироловой ($n = 1,6$) линзы, с помощью которой может быть сформирован плоский фазовый фронт в раскрыве оптимального конического рупора диаметром $d_p = 72 \text{ см}$, работающего на волне длиной $\lambda = 8 \text{ см}$. Определить максимальный КНД рупора с линзой и без нее, приближенно считая, что характер изменения амплитуды поля в раскрыве линзы такой же, как и в раскрыве рупора без линзы.

5. Определить эквивалентное нормированное последовательное сопротивление поперечной полуволновой щели, сдвинутой с продольной оси волновода сечением $a \times b = 5,8 \times 2,5 \text{ см}$ на расстояние $x_2 = 0,8 \text{ см}$, если длина волны в волноводе равна $\lambda_g = 10 \text{ см}$.

Вариант № 52

1. Волновое сопротивление симметричного полуволнового вибратора $w_g = 600 \text{ Ом}$. Определить резонансную длину вибратора, если его диаметр $2a = 16 \text{ мм}$.

2. Определить резонансную длину волны, действующую высоту, входное сопротивление, КПД несимметричного вертикального заземленного четвертьволнового вибратора высотой $l = 140 \text{ м}$, радиус которого $a = 3 \text{ мм}$, а сопротивление потерь $R_{\text{п}} = 6,5 \text{ Ом}$.

3. Определить угол раскрыва $2\theta_p$ и диаметр d_p раскрыва конического рупора оптимальных размеров, длина которого $L_{\text{онм}} = 40 \text{ см}$. Рабочая длина волны равна $\lambda = 8 \text{ см}$.

4. На какой угол (в радианах) относительно фокальной оси смещается максимум ДН линзовой антенны из полиэтилена ($n = 1,5$) при выносе фазового центра облучателя из фокуса на расстояние $\Delta x = 4 \text{ см}$ в направлении, перпендикулярном ее фокальной оси, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы?

5. Эквивалентное нормированное последовательное сопротивление поперечной полуволновой щели, расположенной симметрично относительно оси волновода, равно $\bar{R}_1 = 0,5$. На какое расстояние x_1 (в см) от оси волновода следует сместить щель, чтобы ее эквивалентное сопротивление уменьшилось в 1,2 раза? Сечение волновода $a \times b = 7,2 \times 3,4 \text{ см}$.

Вариант № 53

1. Симметричный вибратор имеет волновое сопротивление $w_g = 800 \text{ Ом}$ и диаметр $2a = 10 \text{ мм}$. Определить рабочую частоту, пренебрегая эффектом укорочения вибратора.

2. Приемная антенна представляет собой вертикальный провод длиной 15 м с волновым сопротивлением 500 Ом . Определить напряжение на входе приемника, включенного в основание антенны, если входное сопротивление приемника равно 100 Ом , сопротивление заземления 20 Ом , частота 3 МГц , а напряженность поля в точке приема 100 мкВ/м .

3. Определить максимальный КНД и в главных плоскостях ширину ДН (в градусах) конического рупора, возбуждаемого волной типа H_{11} круглого волновода, длина которого $L_{\text{онм}} = 40 \text{ см}$. Рабочая длина волны $\lambda = 8 \text{ см}$.

4. Максимум ДН линзовой антенны из полиэтилена ($n = 1,5$) при выносе фазового центра облучателя из фокуса на расстояние $\Delta x = 6 \text{ см}$ в направлении, перпендикулярном ее фокальной оси, смещается относительно этой оси на угол $\delta\theta = 175 \text{ мрад}$. Определить толщину линзы, если диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 10$ поперечных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$. На какое расстояние (в см) следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 7,2 \times 3,4 \text{ см}$.

Вариант № 54

1. Волновое сопротивление симметричного волнового вибратора $w_g = 360 \text{ Ом}$. Определить диаметр вибратора, если его длина $2l = 30 \text{ см}$. Эффектом укорочения вибратора пренебречь.

2. Определить волновое сопротивление и реактивную составляющую входного сопротивления несимметричного вертикального заземленного вибратора высотой $l = 100 \text{ м}$, если диаметр цилиндрической поверхности вибратора $2a = 1 \text{ м}$. Антенна состоит из $N = 6$ проводов диаметром $2r_0 = 6 \text{ мм}$ каждый и работает на волне $\lambda = 360 \text{ м}$.

3. Определить ширину ДН (в градусах) на уровне половинной мощности и максимальный КНД оптимального конического рупора, возбуждаемого волной типа H_{11} круглого волновода, если диаметр раскрыва рупора равен 80 см , а рабочая длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$.

4. Какую относительную ширину полосы рабочих частот имеет металлопластинчатая линзовая антенна, работающая на волне длиной $\lambda = 3,2 \text{ см}$? Расстояние между пластинами линзы $a_1 = 2 \text{ см}$. Диаметр раскрыва и фокусное расстояние линзы одинаковы $d_p = f_a = 30 \lambda$.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 10$ поперечных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 13 \text{ см}$. На какое рас-

стояние (в см) следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 7,2 \times 3,4$ см.

Вариант № 55

1. Симметричный полуволновой вибратор длиной $2l = 1$ м выполнен из круглого проводника диаметром $d = 0,05$ м. Определить собственную длину волны и коэффициент укорочения волны в вибраторе. Определить те же параметры вибратора при $d = 0,01$ м. Сравнить полученные результаты.

2. Во сколько раз диаметр цилиндрической поверхности несимметричного вертикального заземленного вибратора, состоящего из $N = 6$ проводов диаметром $2r_0 = 4$ мм каждый, должен быть больше диаметра того же вибратора, состоящего из проводов диаметром $2r_0 = 8$ мм, чтобы при работе на одной и той же частоте их волновые сопротивления были одинаковы?

3. Определить размеры L_{opt} и d_p оптимального конического рупора, возбуждаемого волной типа H_{11} круглого волновода, если ширина ДН в плоскости H равна 10° , а рабочая длина волны $\lambda = 32$ см.

4. Определить максимальный КНД, ширину полосы рабочих частот и КБВ в фидере облучателя металлопластинчатой линзы, если расстояние между пластинами $a_1 = 1,5$ см, длина рабочей волны $\lambda = 2$ см, а размеры линзы равны $d_p = f_a = 40$ см.

5. Волноводно-щелевая антенна бегущей волны состоит из $N = 7$ поперечных полуволновых щелей, расположенных на расстоянии 3 см друг от друга. Полагая возбуждение щелей равноамплитудным, определить угол отклонения максимума ДН от продольной оси волновода, если поперечные размеры волновода $1 \times 2,3$ см, а длина волны генератора $\lambda = 4$ см. На каком минимальном расстоянии должны располагаться щели, чтобы максимум ДН был направлен по нормали к широкой стенке волновода?

Вариант № 56

1. Симметричный полуволновой вибратор длиной $2l = 1$ м выполнен из круглого проводника диаметром $d = 0,05$ м. Найти собственную длину волны и коэффициент укорочения вибратора. Определить диапазон волн, в пределах которого активная составляющая входного сопротивления вибратора изменяется не более, чем в два раза по сравнению с сопротивлением на собственной длине волны.

2. Максимальная напряженность электрического поля, создаваемого несимметричным вертикальным заземленным четвертьволновым вибратором высотой $l = 60$ м, на расстоянии $r = 80$ км от него равна $E_{max} = 5$ мВ/м. Определить волновое сопротивление, эквивалентный и геометрический диаметры цилиндрической поверхности вибратора, если диаметры каждого из его $N = 8$ проводов равны $2r_0 = 5$ мм, а напряжение в максимуме составляет $U_{max} = 2$ кВ.

3. Во сколько раз необходимо увеличить размеры оптимального конического рупора, возбуждаемого волной типа H_{11} круглого волновода, чтобы ширина его диаграммы направленности осталась неизменной при увеличении длины волны генератора в 10 раз?

4. Какое расстояние должно быть между металлическими пластинами ускоряющей линзы, чтобы на волне длиной $\lambda = 4$ см показатель преломления линзы был равен 0,5?

5. Плоская равноамплитудная эквидистантная ($d_x = d_y = 3\lambda/4$) решетка синфазных вертикальных симметричных вибраторов, длиной $2l = 3\lambda/4$ каждый, имеет параметры: $D_0 = 1425$; $R_{\Sigma C} = 360$ Ом; $N_x = 2N_y$. Определить ширину диаграмм направленности (в радианах) антенны на уровнях 0,5 по мощности и нулевого излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также уровень и направления (в радианах) первых боковых лепестков.

Вариант № 57

1. Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $2l = 2$ м на волне длиной $\lambda = 5$ м, если его волновое сопротивление $w_g = 360$ Ом.

2. Определить резонансную длину плоской щелевой полуволновой антенны, работающей на волне длиной $\lambda = 80$ см. Ширина щели b равна: а) 4 см; б) 2 см.

3. Определить размеры оптимального конического рупора, ширина ДН которого в плоскости H на уровне 0,5 по мощности составляет $2\theta_{0,5}^H = 0,175$ рад, а длина рабочей волны равна $\lambda = 3$ см.

4. Определить толщину, угол раскрыва (в радианах) и относительную ширину полосы рабочих частот металлопластинчатой линзы. Расстояние между пластинами $a_1 = 6$ см, длина волны $\lambda = 10$ см, а размеры линзы равны $d_p = f_a = 1,5$ м. Как изменятся толщина и ширина полосы рабочих частот линзы, если ее сделать зонированной? Величину утолщения линзы принять равной $z_2 = 3$ см.

5. Определить размеры сечения и длину каждого из четырех оптимальных H -плоскостных идентичных секториальных рупоров, образующих синфазную решетку, если в плоскости H ширина ДН антенны на уровне 0,5 по мощности составляет $2\theta_{0,5}^H = 70$ мрад, длина волны равна $\lambda = 3$ см, а передача энергии от генератора к антенне осуществляется по волноводу сечением $a \times b = 2,3 \times 1$ см. Чему равен максимальный КНД антенны?

Вариант № 58

1. Определить величину и характер реактивной составляющей входного сопротивления симметричного вибратора, имеющего длину $2l = 3$ м и волновое сопротивление $w_g = 400$ Ом. Частота генератора $f = 75$ МГц.

2. Рассчитать входное сопротивление щелевой антенны в средних точках для следующих случаев: а) $2l = 0,1\lambda$; б) $2l = 0,5\lambda$; в) $2l = \lambda$. Волновое сопротивление металлического аналога равняется 100 Ом . Потери не учитывать.

3. Оптимальная коническая рупорная антенна имеет КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 50$. Длина рупора $L_{\text{онм}} = 40 \text{ см}$. Определить длину волны, на которой работает антенна, и в плоскостях H и E ширину ее ДН (в радианах) на уровне $0,5$ по мощности.

4. Определить толщину гладкой и зонированной металлопластинчатых линз, если расстояние между пластинами $a_1 = 5 \text{ см}$, диаметр и фокусное расстояние $d_p = f_a = 1,5 \text{ м}$, длина волны $\lambda = 8 \text{ см}$, а величина утолщения линзы $z_2 = 2 \text{ см}$. Сколько зон имеет такая линза? Во сколько раз ширина полосы рабочих частот зонированной металлопластинчатой линзы больше ширины полосы рабочих частот такой же гладкой линзы?

5. Сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов, равно $R_{\Sigma C} = 50 \text{ Ом}$. Известно, что ток в пассивном вибраторе по фазе опережает ток в активном вибраторе на угол $\Delta\Phi = 2 \text{ рад}$. Во сколько раз амплитуда тока в пассивном вибраторе меньше амплитуды тока в активном вибраторе, если расстояние между вибраторами $d = 0,15\lambda$?

Вариант № 59

1. Симметричный вибратор имеет размеры: $2a = 12 \text{ мм}$; $2l = 18 \text{ см}$. Определить величину и характер реактивной составляющей входного сопротивления вибратора на частоте $f = 750 \text{ МГц}$.

2. Определить ширину ДН (в градусах) и длину волны, на которой работает линейная антенна длиной 6 м с синфазным равноамплитудным распределением тока, если направление максимума первого бокового лепестка составляет 60° относительно оси антенны.

3. Определить максимальный КНД и эффективную площадь оптимальной конической рупорной антенны, работающей на волне длиной $\lambda = 12 \text{ см}$. Длина рупора составляет $L_{\text{онм}} = 18 \text{ см}$.

4. Определить максимальный КНД зонированной металлопластинчатой линзы, работающей на волне длиной $\lambda = 19 \text{ см}$ и имеющей параметры: число зон $q = 4$; $2\Delta f/f_0 = 8,5 \%$; $d_p = f_a$. Рассчитать технические допуски на точность изготовления антенны.

5. Волноводно-щелевая антенна бегущей волны состоит из $N = 7$ поперечных полуволновых щелей, расположенных на расстоянии 3 см друг от друга. Полагая возбуждение щелей равноамплитудным, определить угол отклонения максимума ДН от продольной оси волновода, если поперечные размеры волновода $1 \times 2,3 \text{ см}$, а длина волны генератора $\lambda = 3,2 \text{ см}$. На каком ми-

нимальном расстоянии должны располагаться щели, чтобы максимум ДН был направлен по нормали к широкой стенке волновода?

Вариант № 60

1. Мощность сигнала, излучаемого передающей антенной на частоте $f = 30 \text{ МГц}$, составляет $P_{\text{пер}} = 15 \text{ Вт}$. Какой КУ должна иметь приемная антенна, установленная на расстоянии $r = 1 \text{ км}$ от передающей, чтобы максимальная мощность принимаемого сигнала была $P_{\text{пр}} = 1 \text{ мВт}$? КУ передающей антенны $G_{\text{пер}} = 10$.

2. Несимметричная вертикальная заземленная антенна имеет высоту $l = 200 \text{ м}$ и работает на волне длиной $\lambda = 1400 \text{ м}$. Амперметр у основания антенны показывает силу тока $I = 45 \text{ А}$. Определить мощность, излучаемую антенной. Потери не учитывать.

3. КНД открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне $\lambda = 10 \text{ см}$, равен $D_0 = 3$. Определить внутренний диаметр волновода.

4. Определить сопротивление излучения антенны, состоящей из полуволновых активного и пассивного вибраторов при расстоянии между ними $d = 0,225\lambda$. Считать, что пассивный вибратор настроен с помощью реактивного сопротивления X_{H2} так, что его ток опережает по фазе ток активного вибратора на угол $\Delta\Phi = \pi/2$. Реактивная составляющая сопротивления пассивного вибратора равна $X_{\Sigma 2} = 42,5 \text{ Ом}$.

5. Синфазная волноводно-щелевая антенна, имеющая $N = 10$ поперечных полуволновых щелей, работает на волне длиной $\lambda = 10 \text{ см}$. На какое расстояние следует сместить щели относительно узкой стенки волновода, чтобы в нем установился режим бегущих волн? Сечение волновода $a \times b = 7,2 \times 3,4 \text{ см}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Свойства некоторых металлов и сплавов, используемых на сверхвысоких частотах

Металл (сплав)	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Удельная проводи- мость при температуре 20 °С, См/м
Серебро.....	10,5	960,5	$6,28 \cdot 10^7$
Медь (отожженная).....	8,92	1083	$5,80 \cdot 10^7$
Золото.....	19,3	1063,5	$4,10 \cdot 10^7$
Алюминий.....	2,702	657	$3,72 \cdot 10^7$
Вольфрам.....	19,3	3370	$1,81 \cdot 10^7$
Латунь (Cu=60%, Zn=40%)..	8,5	930	$1,65 \cdot 10^7$
Никель.....	8,8	1455	$1,28 \cdot 10^7$
Железо.....	7,86	1535	$1,00 \cdot 10^7$
Нихром.....	—	1385	$9,99 \cdot 10^7$
Платина.....	21,4	1773,5	$9,97 \cdot 10^7$
Олово.....	7,3	232	$6,54 \cdot 10^7$

Примечание. В качестве проводника на сверхвысоких частотах применяется также графит, имеющий удельную проводимость $1,25 \cdot 10^8$ См/м. Температура плавления графита равна 3572°С.

Таблица П.2

Свойства диэлектриков на СВЧ

Диэлектрик	Частота $f=1$ ГГц ($\lambda=30$ см)		Частота $f=3$ ГГц ($\lambda=10$ см)		Частота $f=10$ ГГц ($\lambda=3$ см)	
	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\text{tg}\delta$
Политетрафторэтилен.....	2,1	0,00015	—	—	—	—
Полиэтилен.....	2,25	0,0002	2,25	0,0004	2,25	0,0005
Полистирол.....	2,55	0,00045	2,55	0,0005	2,55	0,0007
Пенистый полистирол	—	0,0009	1,05	0,00003	—	—
Эскапон.....	2,4	0,006	—	—	—	—
Совенит.....	3,47	0,0036	—	—	—	—
Микалекс.....	7	0,00054	6,91	0,0036	—	—
Стеапит.....	6,25	—	6,25	0,00055	—	—
Плавленный кварц.....	—	0,0003	3,8	0,0001	3,8	0,0001
Слюда мусковит.....	5,4	0,005	5,4	0,0003	5,4	0,0003
Слюда флогопит.....	5	—	—	—	—	—
Плексиглас.....	—	—	—	—	2,61	0,0084
Текстолит.....	—	—	—	—	3,67	0,060
Эбонит.....	—	—	—	—	2,67	0,006
Фторопласт-4.....	2	0,0002	—	—	2,08	0,00037
Керамика стеатитовая.....	5,5	0,0015	5,2	—	5,2	0,003
Керамика форстеритовая	5,9	0,0005	5,8	—	5,8	0,0001
Стекло С49-2.....	—	—	—	—	5,2	0,009
Стекло С38-1.....	—	—	—	—	4,2	0,0029
Стекло С48-1.....	—	—	—	—	4,9	0,0065
Вода.....	—	—	77	0,15	59	0,46

Таблица П.3

Электрические характеристики коаксиальных кабелей с изоляцией
из стабилизированного полиэтилена

Марка ка- беля	Волновое со- против- ление, Ом	Погонная емкость, пФ/м	Максимальное погонное затухание (∂ Б/м) на различных частотах, МГц				
			10	100	1000	3000	10 000
РК-50-2-11	50±2	115	0,05	0,18	0,62	1,35	—
РК-50-2-13	50±2	115	0,05	0,18	0,68	1,40	—
РК-50-3-11	50±2	110	0,04	0,13	0,60	1,30	—
РК-50-3-13	50±2	110	0,03	0,13	0,1	1,40	—
РК-50-4-11	50±2	110	0,03	0,10	0,50	1,20	3,0
РК-50-4-13	50±2	110	0,03	0,10	0,51	1,30	3,0
РК-50-7-11	50±2	115	0,02	0,08	0,42	0,7	—
РК-50-7-15	50±2	115	0,02	0,08	0,43	0,7	—
РК-50-7-12	50±2	115	0,02	0,09	0,50	1,10	2,3
РК-50-7-16	50±2	115	0,02	0,09	0,50	1,15	2,3
РК-50-11-11	50±2	115	0,018	0,06	0,26	0,5	—
РК-50-11-13	50±2	115	0,018	0,06	0,29	0,52	—
РК-75-4-11	75±3	72	0,032	0,10	0,45	1,0	—
РК-75-4-15	75±3	76	0,032	0,10	0,45	1,0	—
РК-75-4-12	75±3	76	0,021	0,105	0,60	1,5	—
РК-75-4-16	75±3	76	0,021	0,105	0,60	1,2	—
РК-75-7-11	75±3	75	0,02	0,07	0,30	1,0	—
РК-75-7-15	75±3	76	0,02	0,07	0,34	1,0	—
РК-75-7-12	75±3	78	0,03	0,10	0,4	0,9	—
РК-75-7-16	75±3	76	0,029	0,09	0,4	1,0	—
РК-75-7-18	75±3	69	0,06	0,22	0,81	1,5	—
РК-100-7-11	100±5	57	0,025	0,75	0,10	0,54	—
РК-100-7-13	100±5	57	0,025	0,88	0,32	0,6	—

Таблица П.4
Конструктивные и электрические данные стандартных прямоугольных волноводов

Тип волновода	Диапазон рабочих частот, ГГц		Внутренние размеры, мм		Максимальное погонное затухание на частоте $f=1,5 f_{кр}$	
	От	До	Ширина	Высота	Затухание дБ/м	Частота ГГц
МЭК-5	0,41	0,62	457,2	228,6	0,00141	0,49
МЭК-6	0,49	0,75	381,0	190,6	0,00186	0,59
МЭК-8	0,6	0,98	292,1	146,1	0,00278	0,77
МЭК-9	0,76	1,15	247,65	123,8	0,00351	0,91
МЭК-12	0,96	1,46	195,58	97,79	0,00506	1,15
МЭК-14	1,14	1,73	165,10	82,55	0,00653	1,36
МЭК-18	1,45	2,20	129,54	64,77	0,00936	1,64
МЭК-22	1,72	2,61	109,22	54,61	0,0121	2,06
МЭК-26	2,17	3,30	86,36	43,18	0,0173	2,61
МЭК-32	2,60	3,95	72,14	34,04	0,0236	3,12
МЭК-40	3,22	4,90	58,17	29,083	0,0311	3,87
МЭК-48	3,94	5,99	47,55	22,149	0,0443	4,73
МЭК-58	4,64	7,05	40,39	20,193	0,0539	5,57
МЭК-70	5,38	8,18	34,85	15,799	0,0720	6,46
МЭК-81	6,58	10,0	28,499	12,624	0,0993	7,89
МЭК-100	8,20	12,5	22,860	10,160	0,127	9,84
МЭК-120	9,84	15,0	19,050	9,525	0,166	11,8
МЭК-140	11,9	18,0	15,799	7,899	0,220	14,2
МЭК-180	14,5	22,0	12,954	6,477	0,298	17,4
МЭК-220	17,6	26,7	10,668	4,318	0,463	21,1
МЭК-260	21,7	33,0	8,636	4,318	0,544	26,1
МЭК-320	26,4	40,1	7,112	3,556	0,729	31,6
МЭК-400	33,0	50,1	5,690	2,845	1,02	39,5
МЭК-500	39,3	59,7	4,775	2,388	1,33	47,1
МЭК-620	49,9	75,8	3,759	1,180	1,90	59,9
МЭК-740	60,5	92,0	3,099	1,550	2,54	72,6
МЭК-900	73,8	112,0	2,540	1,270	3,43	88,6
МЭК-1200	92,3	140,0	2,032	1,016	4,78	111,0

Примечание. МЭК - сокращенное название Международной электрической комиссии, работавшей данный стандарт волноводов. Содержащееся в обозначении типа волновода число показывает приближенно среднюю частоту рабочего диапазона в сотнях мегагерц.

Таблица П.5

Влияние амплитудно-фазового распределения на параметры апертурного излучателя

ξ, u	Амплитудное распределение	Множитель направленности и значение КИП (v)	Δ	n	$2\theta_{0,5}$, град	УБЛ ₁ , дБ	КИП v
$\xi = 2x/L; u = (kL/2)\sin\theta$ (прямоугольная апертура)	1	$\sin u/u$	-	-	$50,8 \frac{\lambda}{L}$	-13,3	1
	$1-(1-\Delta)\xi^2$	$\frac{3}{2+\Delta} \left[\Delta \frac{\sin u}{u} - 2(1-\Delta) \frac{\cos u}{u^2} + 2(1-\Delta) \frac{\sin u}{u^3} \right];$ $v = \frac{5}{3} \frac{(2+\Delta)^2}{8+4\Delta+3\Delta^2}$	0,5	-	$55,6 \frac{\lambda}{L}$	-17,1	0,97
			0,316	-	$57,3 \frac{\lambda}{L}$	-19	0,935
			0,1	-	$62,5 \frac{\lambda}{L}$	-21	0,872
			0	-	$65,9 \frac{\lambda}{L}$	-21,3	0,833
	$\Delta + (1-\Delta) \cos \frac{\pi\xi}{2}$	$\left[(1-\Delta) \frac{2}{\pi} + \Delta \right]^{-1} \left[\Delta \frac{\sin u}{u} + \frac{\pi}{2} (1-\Delta) \frac{\cos u}{\pi^2/4-u^2} \right];$ $v = \left[\frac{2}{\pi} (1-\Delta) + \Delta \right]^2 \times$ $\times \left[\frac{(1-\Delta)^2}{2} + \frac{4}{\pi} \Delta(1-\Delta) + \Delta^2 \right]^{-1}$	0,5	-	$55,6 \frac{\lambda}{L}$	-17,6	0,966
			0,316	-	$58,4 \frac{\lambda}{L}$	-20	0,935
			0,1	-	$63 \frac{\lambda}{L}$	-22,4	0,874
			0	-	$67 \frac{\lambda}{L}$	-22,9	0,811
	$\xi = r/R; u = kR \sin \theta$ (круглая апертура)	1	$\Lambda_1(u)$	-	-	$58,5 \frac{\lambda}{L}$	-17,6
$1-(1-\Delta)\xi^2$		$\frac{2}{1+\Delta} \left[\Delta \Lambda_1(u) + \frac{1}{2} (1-\Delta) \Lambda_2(u) \right];$ $v = 3(1+\Delta)^2 / 4(1+\Delta+\Delta^2)$	0,5	-	$62,5 \frac{\lambda}{L}$	-20,6	0,964
			0,316	-	$65,3 \frac{\lambda}{L}$	-22,4	0,917
			0,1	-	$69,9 \frac{\lambda}{L}$	-24,2	0,818
			0	-	$72,8 \frac{\lambda}{L}$	-24,6	0,75
$(1-\xi^2)^n$		$\Lambda_{n+1}(u), \quad v = \frac{2n+1}{(n+1)^2}$	0	2	$84,2 \frac{\lambda}{L}$	-30,6	0,555
			0	3	$94,5 \frac{\lambda}{L}$	-36	0,438
			0	4	$105,4 \frac{\lambda}{L}$	-40,9	0,36

Таблица П.6
Международная классификация частотных диапазонов

Номер диапазона	Наименование диапазона (частотное)	Условное обозначение (частотное)	Диапазон частот	Наименование диапазона (метрическое)
-1	Крайне низкие частоты	КНЧ (ELF)	0,03. ...0,3 Гц	Гигаметровые волны
0			0,3. ...3 Гц	Гектомегаметровые волны
1			3. ...30 Гц	Декамегаметровые волны
2			30. ...300 Гц	Мегаметровые волны
3	Ультранизкие частоты	УНЧ (ULF)	300. ...3000 Гц	Гектокилометровые волны
4	Очень низкие частоты	ОНЧ (VLF)	3 ...30 кГц	Мириаметровые волны
5	Низкие частоты	НЧ (LF)	30... 300 кГц	Километровые волны
6	Средние частоты	СЧ (MF)	300. ...3000 кГц	Гектометровые волны
7	Высокие частоты	ВЧ (HF)	3...30 МГц	Декаметровые волны
8	Очень высокие частоты	ОВЧ (VHF)	30... 300 МГц	Метровые волны
9	Ультравысокие частоты	УВЧ (UHF)	300. ...3000 МГц	Дециметровые волны
10	Сверхвысокие частоты	СВЧ (SHF)	3. ...30 ГГц	Сантиметровые волны
11	Крайне высокие частоты	КВЧ (EHF)	30. ...300 ГГц	Миллиметровые волны
12			300. ...3000 ГГц	Децимиллиметровые волны
13			3. ...30 ТГц	Сантимиллиметровые волны
14			30...300 ТГц	Микрометровые волны
15			300. ...3000 ТГц	Децимикрометровые волны

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
2. Антенны и устройства СВЧ / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1972. – 320 с.
3. Антенны и устройства СВЧ / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.
4. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
5. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
6. Ротхаммель К., Кришке Ф. Антенны. Т.1. – Минск: ОМО «Наш город», 2001. – 416 с.
7. Ротхаммель К., Кришке Ф. Антенны. Т.2. – Минск: ОМО «Наш город», 2001. – 416 с.
8. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию). – СПб., 2001. – 250 с.
9. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны. – Томск: ТМЦДО, 2001. – 129 с.
10. Гошин Г.Г., Замотринский В.А., Шангина Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Учебное методическое пособие. – Томск: ТМЦДО, 2001. – 161 с.
11. Гошин Г.Г. Антенны и фидеры. Сборник задач с формулами и решениями. – Томск: ТУСУР, 2003. – 242 с.
12. Драбкин А.Л., Кислов А.Г., Ногин И.И., Цыган Н.Я. Задачник по курсу антенно-фидерных устройств. – Ленинград: ЛВИКА им. Можайского, 1964. – 50 с.
13. Белоцерковский Г.Б. Задачи и расчеты по курсу «Основы радиотехники и антенны». – М.: Машиностроение, 1966. – 199 с.
14. Шипков Г.А. Задачник по антенно-фидерным устройствам. – М.: Высшая школа, 1966. – 180 с.
15. Хмель В.Ф. Антенны и устройства СВЧ: Сборник задач. – Киев: Выща школа, 1976. – 216 с.
16. Хмель В.Ф., Чаплин А.Ф., Шумлянский И.И. Антенны и устройства СВЧ: Сборник задач. – Киев: Выща школа, 1990. – 232 с.