

Кафедра 406 МАИ
Радиофизика, антенны и микроволновая техника
Учебная лаборатория «Антенны и микроволновая техника»

Лабораторная работа № 6.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
РУПОРНЫХ АНТЕНН
И МЕТАЛЛОПЛАСТИНЧАТОЙ
ЛИНЗЫ**

Работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНЫХ АНТЕНН И МЕТАЛЛОПЛАСТИНЧАТОЙ ЛИНЗЫ

Цель работы

1. Изучить принцип работы рупорных антенн и металлопластинчатой линзы.
2. Изучить влияние амплитудного и фазового распределения поля в раскрыве рупора на форму его диаграммы направленности.
3. Исследовать влияние размеров рупора, а также металлопластинчатой линзы в раскрыве рупора на его диаграмму направленности.

Теоретическая подготовка к работе

Для выполнения работы необходимо изучить теоретический материал по рупорным и линзовым антеннам, изложенный в лекциях по курсу «Устройства СВЧ и антенны». Этот же материал можно найти в [1,2,3,4]. Кроме того, необходимо изучить определение характеристик направленности антенн (Приложение А).

Рупорная антенна образуется в результате расширения излучающего раскрыва прямоугольного или круглого волновода. При плавном расширении раскрыва волновода можно сохранить в увеличенном раскрыве рупора такую же структуру поля, как и в основном типе волны в волноводе. При этом постепенный переход от поперечного сечения волновода к раскрыву рупора улучшает его согласование со свободным пространством.

На рис. 6.1 изображены различные варианты рупорных антенн. При расширении раскрыва прямоугольного волновода только в одной плоскости образуется секториальный рупор. В зависимости от того, в какой плоскости происходит расширение, различают *H*-плоскостные и *E*-плоскостные секториальные рупоры. При расширении раскрыва волновода в обеих плоскостях образуется пирамидальный рупор. При расширении раскрыва круглого волновода получается конический рупор.

На практике наиболее часто используются пирамидальные и секториальные рупоры. Конические рупоры из-за неустойчивости плоскости поляризации и наличия кроссполяризационных потерь применяются реже.

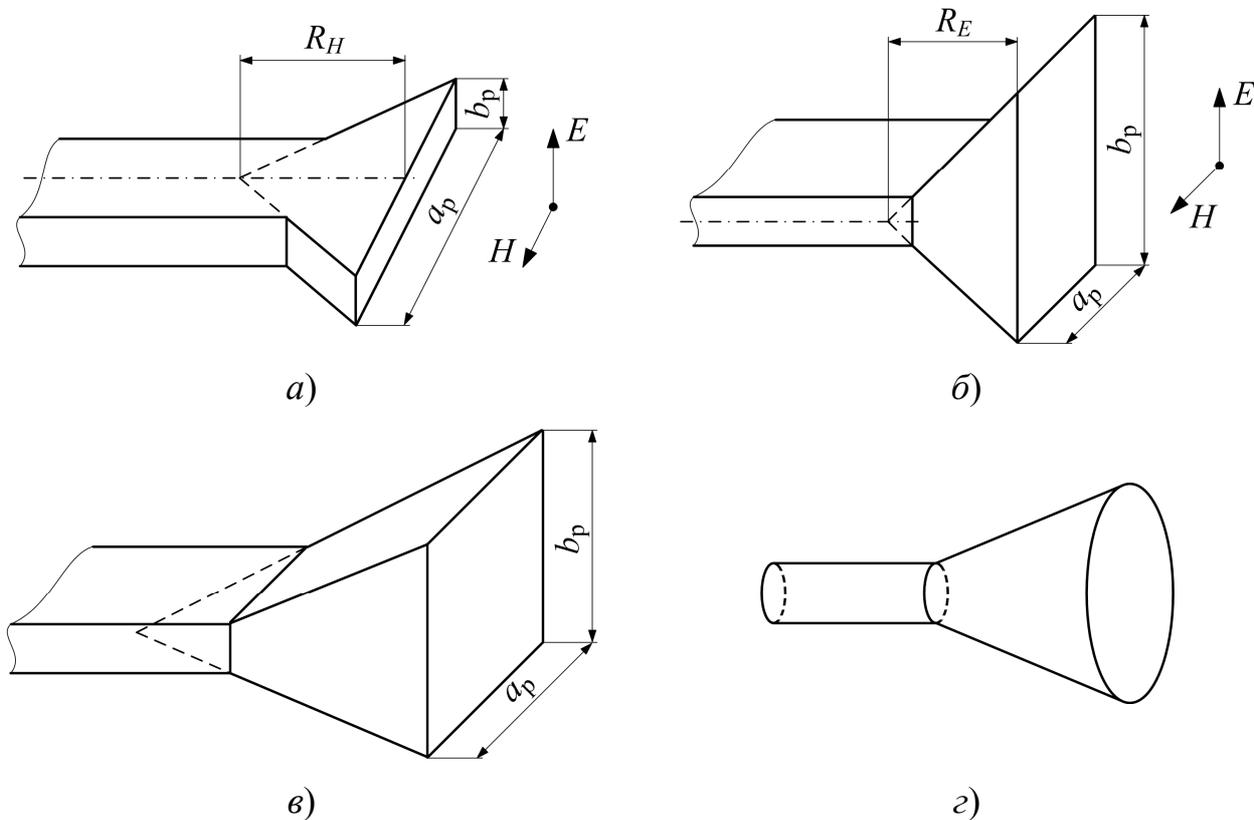


Рис. 6.1. Варианты рупорных антенн: *а* – *H*-секториальный рупор; *б* – *E*-секториальный рупор; *в* – пирамидальный рупор; *г* – конический рупор

На рис. 6.2 показано продольное сечение *H*-плоскостью рупора с прямоугольным раскрытием: R_H – длина рупора в *H*-плоскости; точка *O* – вершина рупора в *H*-плоскости; угол при вершине 2α – угол раскрытия в *H*-плоскости; a_p – ширина раскрытия рупора в *H*-плоскости. Аналогичные параметры вводятся и при сечении пирамидального рупора *E*-плоскостью, причем в общем случае $R_E \neq R_H$.

Для изучения характеристик рупорной антенны окружим ее замкнутой поверхностью S , состоящей из поверхности плоского раскрытия S_a и внешней поверхности рупорной антенны. Полагаем, что на внешней поверхности рупора тангенциальные составляющие электрического и магнитного поля равны нулю.

На поверхности раскрыва S_a поле определяется из решения внутренней задачи для бесконечного рупора. Анализ этого решения позволяет выявить следующие закономерности в характере поведения поля в рупоре:

1. Тип волны в рупоре является таким же, как и в волноводе, возбуждающем рупор.

2. В отличие от волновода поверхностью равных фаз в рупоре является не плоскость, а поверхность цилиндра с центром в вершине O для секториального рупора и поверхность сфероида для пирамидального рупора.

3. Фазовая скорость волны в рупоре не постоянна. Она больше в горловине рупора и приближается к скорости света в его раскрыве.

4. В рупоре, в отличие от волновода, отсутствует критическая длина волны. Это объясняется тем, что у бесконечного рупора всегда можно найти такое сечение, которое окажется достаточным для распространения любого типа волны.

5. Локальное поверхностное сопротивление W_S в раскрыве рупора приближенно равно волновому сопротивлению свободного пространства W_0 .

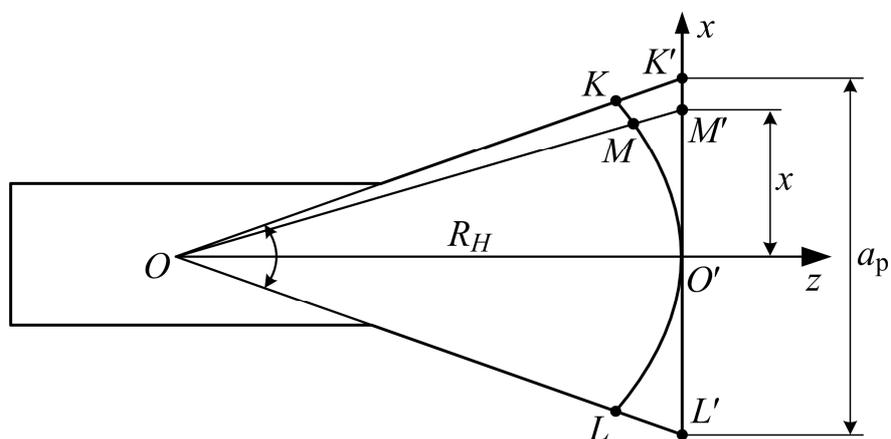


Рис. 6.2. Продольное сечение H -плоскостью рупора с прямоугольным раскрывом

С учетом указанных закономерностей поле в раскрыве пирамидального рупора при возбуждении его прямоугольным волноводом с волной H_{10} можно записать в следующем виде:

$$E_y = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a_p}\right) e^{-i\psi(x,y)}, \quad H_x = \frac{E_y}{W_0}, \quad (6.1)$$

где E_0 – напряженность электрического поля в середине раскрыва; $\psi(x,y)$ – фазовая ошибка в раскрыве рупора, возникающая из-за того, что фазовый фронт в рупоре не является плоским.

Проанализируем более подробно характер фазовой ошибки в H -секториальном рупоре, продольное сечение которого показано на рис. 6.2. Дуга окружности KML с центром в вершине рупора O является линией равных фаз. В произвольной точке M' с координатой x фаза поля отстает от фазы поля в середине раскрыва (в точке O') на величину $\psi_H(x)$:

$$\psi_H(x) = \frac{2\pi}{\lambda}(OM' - R_H) = \frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{R_H^2 + x^2} - R_H) = \frac{2\pi}{\lambda}R_H\left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{R_H^2}} - 1\right).$$

Раскладывая $\sqrt{1 + x^2/R_H^2}$ в ряд Тейлора и ограничиваясь при $x \ll R_H$ первыми двумя членами ряда, находим выражение для расчета фазовой ошибки в раскрыве H -секториального рупора:

$$\psi_H(x) \approx \frac{\pi x^2}{\lambda R_H}.$$

Отсюда видно, что фаза поля в раскрыве H -секториального рупора меняется приблизительно по квадратичному закону. Максимальная фазовая ошибка достигается на краю рупора:

$$\psi_{H\max} \approx \frac{\pi a_p^2}{4 \lambda R_H}.$$

Это соотношение справедливо при $R_H > a_p/2$.

Для E -секториального рупора может быть получено аналогичное выражение для максимальной фазовой ошибки на краю рупора $\psi_{E\max} \approx \frac{\pi b_p^2}{4 \lambda R_E}$, справедливое при $R_E > b_p/2$.

Для пирамидального рупора фазовая ошибка в раскрыве $\psi(x, y)$ также имеет квадратичный характер:

$$\psi(x, y) \approx \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{R_H} + \frac{y^2}{R_E} \right),$$

а максимальная фазовая ошибка достигается в углах прямоугольного раскрыва:

$$\psi_{\max} \approx \frac{\pi}{4} \left[\frac{a_p^2}{\lambda R_H} + \frac{b_p^2}{\lambda R_E} \right].$$

Рассмотрим диаграмму направленности (ДН) H -секториального рупора.

Поле в раскрыве такого рупора записывается в виде

$$E_y = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a_p}\right) e^{-i\frac{\pi x^2}{\lambda R_H^2}}. \quad (6.2)$$

В H -плоскости амплитудная ДН зависит от величины максимальной фазовой ошибки в раскрыве рупора. Если $\psi_{H\max} \leq 3\pi/4$, то в первом приближении поле в раскрыве рупора можно считать синфазным. Тогда амплитудная ДН в H -плоскости будет иметь вид

$$F(\varphi) \approx \frac{1 + \cos\varphi}{2} \frac{\cos\left(\frac{ka_p}{2} \sin\varphi\right)}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin\varphi\right)^2}.$$

В E -плоскости амплитудная ДН получается такой же, как у прямоугольного раскрыва с равноамплитудным и синфазным полем, так как поле в раскрыве рупора вдоль оси OY не меняется:

$$F(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kb_p}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kb_p}{2} \sin\theta}.$$

Для E -секториального рупора амплитудная ДН в двух плоскостях описывается следующими соотношениями:

в H -плоскости

$$F(\varphi) = \frac{1 + \cos\varphi}{2} \frac{\cos\left(\frac{ka_p}{2} \sin\varphi\right)}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin\varphi\right)^2};$$

в E -плоскости при условии $\psi_{E\max} \leq \pi/2$

$$F(\theta) \approx \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kb_p}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kb_p}{2} \sin\theta}.$$

Для пирамидального рупора с небольшой фазовой ошибкой в раскрыве амплитудные ДН в E - и H -плоскостях могут быть рассчитаны по формулам, приведенным для секториальных рупоров.

Следует учитывать, что расчет ДН рупорных антенн как по приближенным соотношениям для синфазного раскрыва, так и по более сложным выражениям с учетом фазовой ошибки можно проводить лишь в пределах основного и первых боковых лепестков, так как уровень дальних боковых лепестков существенно определяется токами, вытекающими на внешнюю поверхность рупора, которые в данном методе не учитываются.

Определим коэффициент направленного действия (КНД) H -секториальной рупорной антенны. Для этого воспользуемся выражением для КНД синфазного раскрыва:

$$D_H = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \int_{S_a} E_S(\mathbf{p}) dS \right|^2}{\int_{S_a} [E_S(\mathbf{p})]^2 dS}, \quad (6.3)$$

где $E_S(\mathbf{p})$ – комплексная амплитуда поля в раскрыве; \mathbf{p} – радиус-вектор точки интегрирования на раскрыве рупора.

Подставляя в (6.3) значение $E_S(\mathbf{p}) = E_y$ из (6.2) и проводя интегрирование, для КНД H -секториальной рупорной антенны получим следующее выражение:

$$D_H = \frac{4\pi b_p R_H}{\lambda a_p} \left\{ [C(u) + C(v)]^2 + [S(u) + S(v)]^2 \right\},$$

где $u = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} - \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right); \quad v = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} + \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right); \quad C(u) = \int_0^u \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt,$

$S(u) = \int_0^u \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$ – интегралы Френеля.

На рис. 6.3, а приведены графики зависимости КНД H -секториальной рупорной антенны D_H от относительного размера раскрыва рупора a_p/λ для различных длин рупора R_H . Для исключения зависимости КНД от размера раскрыва рупора b_p по вертикальной оси откладывается значение $(\lambda/b_p)D_H$.

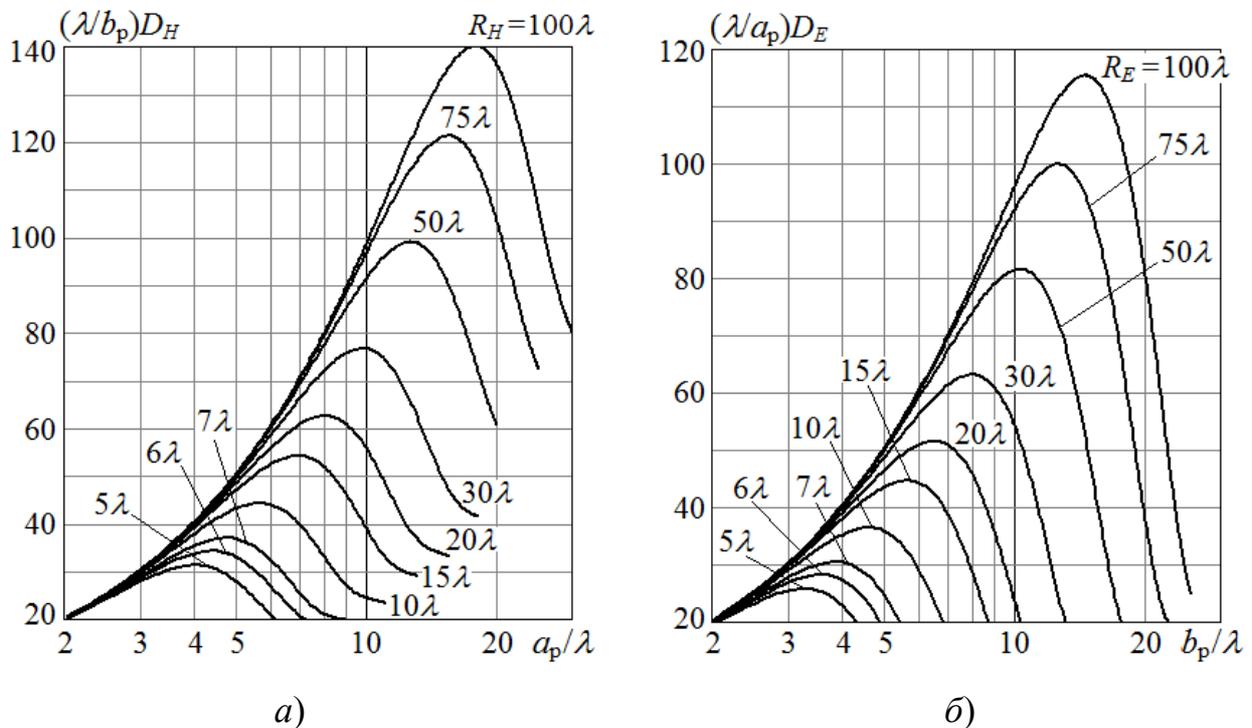


Рис. 6.3. Графики зависимости КНД рупорной антенны от относительного размера раскрыва: а – H -секториальный рупор; б – E -секториальный рупор

Из графиков, приведенных на рис. 6.3, а, следует, что для каждой длины рупора R_H существует оптимальная ширина раскрыва a_p/λ , при которой КНД достигает максимального значения. При увеличении a_p/λ сверх этого значения КНД уменьшается, что объясняется резким возрастанием фазовых ошибок в раскрыве.

Рупоры, размеры которых соответствуют максимальному значению КНД, называются оптимальными. По графикам на рис. 6.3, а можно установить, что максимальные значения КНД достигаются при следующем соотношении значений длины рупора и ширины его раскрыва:

$$\frac{R_H}{\lambda} = \frac{1}{3} \left(\frac{a_p}{\lambda} \right)^2.$$

Отсюда определяют оптимальную длину H -секториального рупора:

$$R_{H\text{опт}} = \frac{a_p^2}{3\lambda},$$

при которой максимальная фазовая ошибка в раскрыве рупора $\psi_{H\text{max}} = \frac{3}{4}\pi$.

Величина коэффициента использования поверхности (КИП) в этом случае $\nu = 0,64$. Если длину рупора взять больше оптимальной, то при сохранении площади раскрыва КНД рупора незначительно возрастет. Если длину рупора непрерывно увеличивать, то при $R_H \rightarrow \infty$ получим синфазное поле в раскрыве с КИП $\nu = 0,81$ (КИП синфазной площадки с косинусоидальным амплитудным распределением). Таким образом, для бесконечного рупора можно повысить КНД примерно на 25% по сравнению с оптимальным значением.

Выражение для КНД E -секториальной рупорной антенны имеет вид

$$D_E = \frac{64a_p R_E}{\pi \lambda b_p} \left[C^2 \left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}} \right) + S^2 \left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}} \right) \right].$$

Графики зависимости КНД от размеров рупора представлены на рис. 6.3, б. Как и для H -секториального рупора, кривые имеют максимум. Максимальные значения КНД такой антенны достигаются при следующем соотношении значений длины рупора и ширины его раскрыва:

$$\frac{R_E}{\lambda} = \frac{1}{2} \left(\frac{b_p}{\lambda} \right)^2.$$

Отсюда определяют оптимальную длину E -секториального рупора: $R_{E\text{опт}} = \frac{b_p^2}{2\lambda}$,

при которой максимальная фазовая ошибка в раскрыве рупора $\psi_{E_{\max}} = \frac{\pi}{2}$.

Коэффициент использования поверхности раскрыва ν оптимального E -секториального рупора имеет такое же значение, как и для оптимального H -секториального рупора ($\nu = 0,64$). Тогда выражение для КНД оптимального E -секториального рупора можно представить в виде

$$D_{E_{\text{опт}}} = 0,64 \frac{4\pi}{\lambda^2} a_p b_p.$$

Коэффициент направленного действия пирамидальной рупорной антенны можно выразить через КНД E - и H -секториальных рупоров:

$$D = \frac{\pi\lambda^2}{32a_p b_p} D_E D_H = \frac{\pi}{32} \left(\frac{\lambda}{a_p} D_E \right) \left(\frac{\lambda}{b_p} D_H \right).$$

При выборе длины рупора, равной оптимальной, происходит некоторое расширение ДН по сравнению с ДН синфазного раскрыва, как показано в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Значения ширины ДН оптимальных рупорных антенн

Тип рупора	Ширина ДН	
	в H -плоскости	в E -плоскости
H -секториальный	$2\Theta_{0,7}^H = 68^\circ \frac{\lambda}{a_p}$	$2\Theta_{0,7}^E = 53^\circ \frac{\lambda}{b_p}$
E -секториальный	$2\Theta_{0,7}^H = 80^\circ \frac{\lambda}{a_p}$	$2\Theta_{0,7}^E = 51^\circ \frac{\lambda}{b_p}$
Пирамидальный	$2\Theta_{0,7}^H = 80^\circ \frac{\lambda}{a_p}$	$2\Theta_{0,7}^E = 53^\circ \frac{\lambda}{b_p}$
Конический	$2\Theta_{0,7}^H = 60^\circ \frac{\lambda}{d_p}$	$2\Theta_{0,7}^E = 70^\circ \frac{\lambda}{d_p}$

В коническом рупоре, образованном расширением открытого конца круглого волновода с волной H_{11} , оптимальная длина зависит от диаметра его раскрытия d_p :

$$R_{\text{опт}} = \frac{d_p^2}{2,4\lambda} - 0,15\lambda .$$

Коэффициент использования поверхности оптимального конического рупора равен $\nu = 0,5$. Деформируя круговой конический рупор в эллиптический с отношением осей эллипса 1,25, можно получить приблизительно одинаковую ширину ДН во всех сечениях, проходящих через ось рупора.

Рупорные антенны используются на практике и как самостоятельные направленные антенны, и в качестве облучателей зеркальных и линзовых антенн, а также в качестве излучателей фазированных антенных решеток. Особенно широко рупорные антенны используются в лабораторных установках при измерении ДН и коэффициентов усиления других антенн.

К достоинствам рупорных антенн относят простоту их конструкции и хорошие диапазонные свойства. Практически рабочая полоса частот рупорной антенны ограничивается полосой питающего ее волновода и составляет около 100%.

Недостаток рупорных антенн заключается в необходимости выбора большой длины рупора для получения остронаправленного излучения. Оптимальная длина рупора пропорциональна квадрату размеров раскрытия a_p и b_p , а ширина ДН обратно пропорциональна размерам a_p и b_p в первой степени. Поэтому для сужения ДН рупорной антенны в n раз размер ее апертуры должен быть увеличен в n раз, а длина рупора – в n^2 раз.

Это обстоятельство накладывает ограничения на ширину ДН рупорных антенн. Так, при длине рупора, примерно равной размеру одной из сторон его раскрытия, ширина ДН составляет около $20^\circ \dots 25^\circ$. При сужении ширины ДН до 10° длина рупора приблизительно в 4–5 раз больше размера большей стороны его раскрытия.

Для уменьшения длины рупора используют различные способы, которые направлены на компенсацию или уменьшение фазовой ошибки в раскрыве рупора. Отметим два способа, которые позволяют добиться этого.

1. Установка в раскрыве рупора линзы, которая устраняет фазовые ошибки (рис. 6.4, *а*). При этом длина рупора выбирается из условий хорошего согласования волновода, питающего рупор, со свободным пространством и приблизительно равна 0,5–1 ширине его раскрыва.

2. Сгибание профиля стенки рупора (рис. 6.4, *б*) для получения в раскрыве синфазного поля за счет выравнивания длины пути, проходимого волной от вершины рупора до различных точек на раскрыве. Для получения в раскрыве синфазного поля кривая *ABC*, образующая профиль стенки согнутого рупора, должна иметь форму параболы.

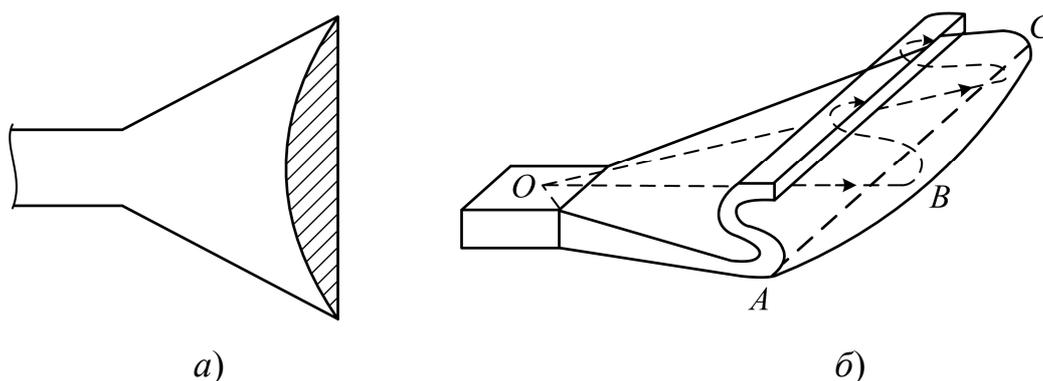


Рис. 6.4. Способы уменьшения фазовой ошибки в раскрыве рупора для уменьшения его длины: *а* – установка линзы; *б* – сгибание рупора

Рассмотрим более подробно первый способ уменьшения длины рупора с помощью установки линзы. Электромагнитная линза представляет собой среду, в которой фазовая скорость распространения электромагнитных волн v_{ϕ} отличается от скорости света c . Если $v_{\phi} < c$, то линза называется замедляющей. При $v_{\phi} > c$ линза называется ускоряющей. Отношение скорости света к фазовой скорости волны в линзе называется коэффициентом преломления линзы и обозначается $n = c/v_{\phi}$. Поверхность линзы, обращенная к источнику облучения, называется освещенной стороной, противоположная (теневая) поверхность линзы называется раскрывом.

Различают линзы с одной преломляющей поверхностью (рис. 6.5, *a* и *б*), когда преобразование фронта волны, падающей на линзу, происходит только на теневой или освещенной поверхности линзы, и двухповерхностные линзы, в которых фокусировка поля производится как освещенной, так и теневой поверхностями. Раскрыв линзы в общем случае может быть образован поверхностью произвольной формы. Линзы с плоским раскрывом (рис. 6.5, *a* и *б*) осуществляют преломление падающего на них поля на освещенной поверхности, линзы со сферической освещенной поверхностью имеют криволинейную теневую преломляющую поверхность. По форме раскрыв линзы может быть круглым или прямоугольным.

Освещенная поверхность линзы является выпуклой для замедляющей линзы (рис. 6.5, *a*) и вогнутой (рис. 6.5, *б*) для ускоряющей линзы. Это вытекает из следующих рассуждений. В замедляющей линзе выравнивание фазового фронта происходит за счет замедления движения отдельных участков фронта. Как следует из рис. 6.5, *a*, центральные участки фронта волны должны замедляться больше по сравнению с периферийными. В ускоряющей линзе спрямление фазового фронта происходит за счет ускорения движения тех участков, которые проходят через линзу. Такими участками на рис. 6.5, *б* в большей степени должны являться периферийные участки фронта.

Принцип действия линзы можно пояснить, используя законы геометрической оптики. Луч, падающий на освещенную поверхность линзы с коэффициентом преломления n под углом φ , преломляется и распространяется далее под углом β (рис. 6.5, *a*), определяемым из соотношения $\sin(\varphi) = n\sin(\beta)$.

Профиль линзы выбирают из условия, при котором сферический фронт волны, исходящий из фокуса линзы, можно было бы трансформировать в плоский фронт после прохождения линзы. С точки зрения фазовых соотношений в раскрыве это означает, что электрическая длина пути от фокуса линзы до произвольной точки N на раскрыве должна быть одной и той же. При этом в плоском раскрыве линзы формируется синфазное поле.

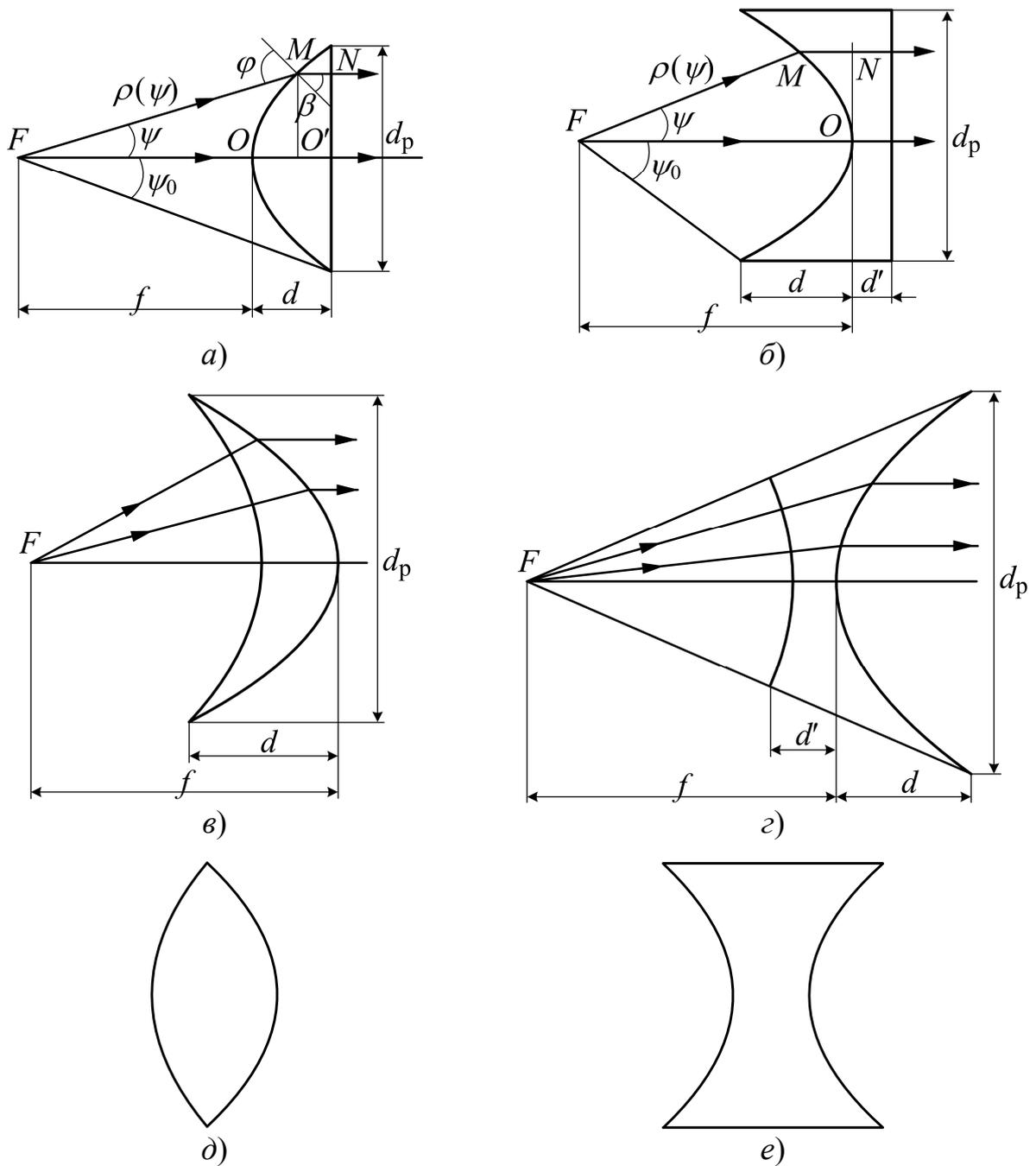


Рис. 6.5. Типы линз: *a* – замедляющая с освещенной преломляющей поверхностью; *б* – ускоряющая с освещенной преломляющей поверхностью; *в* – замедляющая с теневой преломляющей поверхностью; *г* – ускоряющая с теневой преломляющей поверхностью; *д, е* – двухповерхностные замедляющие и ускоряющие линзы

Получим уравнения профилей ускоряющей и замедляющей линз, изображенных на рис. 6.5, *a* и *б*, где введены соответствующие обозначения.

Сначала рассмотрим две точки O и N на раскрыве ускоряющей линзы (рис. 6.5, б). Точка O лежит на фокальной оси линзы, точка N – произвольная. В точку O волна попадает из фокуса F по прямой FO , в точку N – по ломаной FMN . Условие равенства электрических длин FO и FMN имеет вид

$$\frac{2\pi}{\lambda}FO = \frac{2\pi}{\lambda}FM + \frac{2\pi}{\lambda_n}MN, \quad (6.4)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве; λ_n – длина волны в линзе.

Введем обозначения $FM = \rho(\psi)$, $FO = f$ (f – фокусное расстояние). Тогда $MN = f - \rho(\psi)\cos(\psi)$. При этом соотношение (6.4) можно записать в виде

$$f = \rho(\psi) + \frac{\lambda}{\lambda_n}[f - \rho(\psi)\cos(\psi)].$$

Учитывая, что коэффициент преломления

$$n = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\lambda}{\lambda_n},$$

окончательно находим уравнение профиля ускоряющей линзы:

$$\rho(\psi) = f \frac{1-n}{1-n\cos(\psi)}. \quad (6.5)$$

При $n < 1$ выражение (6.5) представляет собой уравнение эллипса в полярной системе координат.

Аналогично для двух точек O' и M в раскрыве замедляющей линзы (рис. 6.5, а) равенство электрических длин путей имеет вид

$$\frac{2\pi}{\lambda}FO + \frac{2\pi}{\lambda_n}OO' = \frac{2\pi}{\lambda}FM,$$

или

$$\frac{2\pi}{\lambda}f + \frac{2\pi}{\lambda_n}[\rho(\psi)\cos(\psi) - f] = \frac{2\pi}{\lambda}\rho(\psi),$$

откуда получаем уравнение для профиля замедляющей линзы:

$$\rho(\psi) = f \frac{n-1}{n\cos(\psi)-1}. \quad (6.6)$$

При $n > 1$ выражение (6.6) представляет собой уравнение гиперболы в полярной системе координат.

Толщина линзы d (рис. 6.5, *a* и *б*) зависит от фокусного расстояния f и ширины раскрыва d_p . С помощью выражения (6.6) находим выражение для определения толщины замедляющей линзы:

$$d = \rho_0 \cos \psi_0 - f = f \cos \psi_0 \frac{n-1}{n \cos(\psi_0) - 1} - f = f \frac{1 - \cos(\psi_0)}{n \cos(\psi_0) - 1}. \quad (6.7)$$

С учетом (6.5) выводим аналогичное выражение для определения толщины ускоряющей линзы:

$$d = f - \rho_0 \cos \psi_0 = f - f \cos \psi_0 \frac{1-n}{1 - n \cos(\psi_0)} = f \frac{1 - \cos(\psi_0)}{1 - n \cos(\psi_0)}. \quad (6.8)$$

Подставляя в (6.7) и (6.8) выражение для косинуса угла раскрыва линзы

$$\cos \psi_0 = \frac{f+d}{\sqrt{\left(\frac{d_p}{2}\right)^2 + (f+d)^2}},$$

в итоге получаем формулы для нахождения толщины линзы:

$$d = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{(d_p/2)^2}{n^2-1}} \quad \text{для замедляющей линзы,} \quad (6.9)$$

$$d = \frac{f}{n+1} - \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 - \frac{(d_p/2)^2}{1-n^2}} \quad \text{для ускоряющей линзы.} \quad (6.10)$$

Из полученных соотношений следует, что для замедляющей линзы $d > 0$ при любых параметрах $n > 1$, d_p и f , а для ускоряющей линзы $d < 0$ лишь при условии

$$f \geq \frac{d_p(1+n)}{2\sqrt{1-n^2}}. \quad (6.11)$$

Это означает, что замедляющая линза может быть сконструирована при любых соотношениях n , d_p и f , а ускоряющая линза не может иметь фокусное расстояние меньше, чем правая часть неравенства (6.11). Заметим, что реальная толщина ускоряющих линз всегда больше толщины d , определяемой выражением (6.10) на конструктивную толщину d' , как показано на рис. 6.5, *б*.

Замедляющие линзы выполняются из диэлектрика с малыми потерями. Коэффициент преломления таких линз полностью определяется относительной

диэлектрической проницаемостью материала линзы ε_d и равен $n = \sqrt{\varepsilon_d}$. Так как ε_d практически не зависит от частоты в очень широком диапазоне частот, то профиль замедляющей линзы также не зависит от частоты.

Ускоряющие линзы представляют собой набор тонких металлических пластин (рис. 6.6), расположенных параллельно вектору электрического поля E волны, падающей на линзу. Металлопластинчатые линзы чаще всего используются в совокупности с рупорными антеннами для компенсации фазовых ошибок в раскрыве рупора. В H -секториальных рупорах используется линза из прямоугольных пластин разной толщины d . Торцы пластин внутри рупора расположены по поверхности эллиптического цилиндра (рис. 6.6, а). В E -секториальных рупорах применяется линза из профилированных по эллипсу одинаковых пластин (рис. 6.6, б). Для выравнивания фазового фронта в пирамидальном рупоре линзу собирают из профилированных пластин разной толщины, осуществляющих фокусирование одновременно в E - и H -плоскостях.

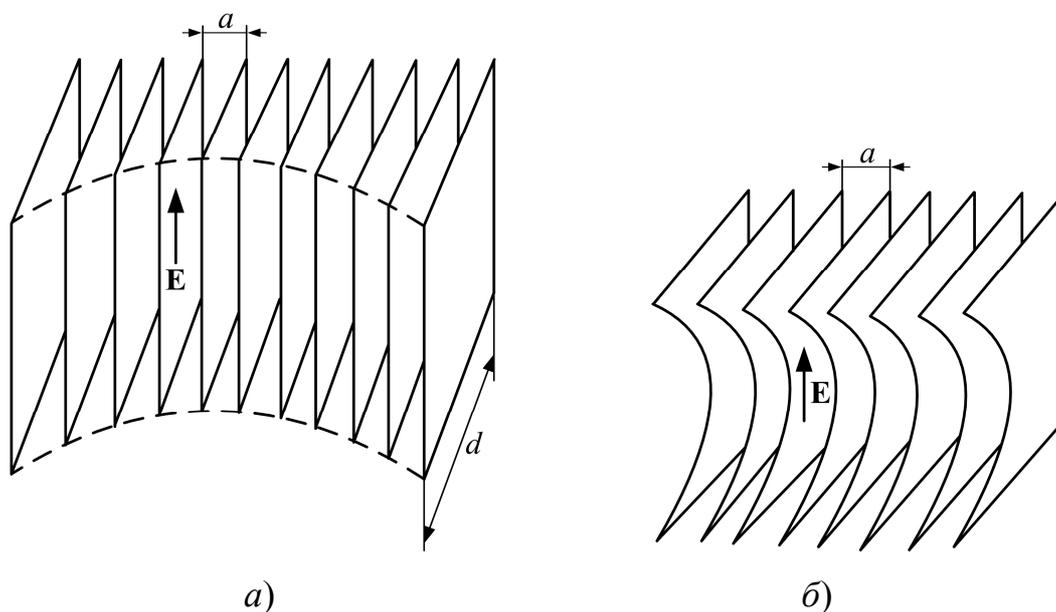


Рис. 6.6. Металлопластинчатые ускоряющие линзы: a – для H -секториального рупора; b – для E -секториального рупора

Пространство между пластинами образует плоский волновод. Если ширина этого волновода a выбрана из условия $\lambda/2 < a < \lambda$, то в плоском

волноводе может распространяться волна типа H_{10} , а все остальные волны находятся в закритическом режиме.

Фазовая скорость волны H_{10} определяется по формуле

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}.$$

Тогда коэффициент преломления металлопластинчатой линзы можно найти следующим образом:

$$n = \frac{c}{v_{\phi}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}.$$

С учетом того, что $\lambda/2 < a < \lambda$, имеется следующее ограничение на диапазон выбора значений коэффициента преломления: $0 < n < 0,86$. Однако на практике приходится учитывать также возможность появления отражений от поверхности линзы, причем отражение волны тем больше, чем заметнее n отличается от 1. Поэтому при конструировании n выбирают в интервале 0,5–0,7. Фокусное расстояние выбирают приблизительно равным ширине раскрыва линзы $f \approx d_p$. При этом толщина линзы составляет несколько десятков процентов от ширины раскрыва.

Расчетные задания и расчетные формулы

1. Расчитать диаграммы направленности в плоскости магнитного вектора для H -секториального рупора и в плоскости электрического вектора для E -секториального рупора при условии отсутствия фазовых искажений в их раскрывах. Оценить по приближенным формулам ширину главного лепестка диаграммы направленности этих двух рупоров.

Размеры H - и E -секториальных рупоров (рис. 6.11) и рабочая длина волны генератора приведены в табл. 6.2, где буквенные обозначения, взятые в круглые скобки, означают, что при переходе от H -секториального к E -секториальному рупору размеры a_p и b_p меняются местами.

Таблица 6.2. Исходные данные для теоретического расчета

№ варианта	λ , см	Номер исследуемого рупора								
		1			2			3		
		$a_p(b_p)$, см	$b_p(a_p)$, см	R , см	$a_p(b_p)$, см	$b_p(a_p)$, см	R , см	$a_p(b_p)$, см	$b_p(a_p)$, см	R , см
1	2,9	14,5	2,3	36,5	14,5	2,3	19,0	14,5	2,3	5,5
2	2,9	12,5	2,3	27,5	12,5	2,3	14,25	12,5	2,3	5,0
3	3,2	14,5	2,3	36,5	14,5	2,3	19,0	14,5	2,3	5,5
4	3,2	12,5	2,3	27,5	12,5	2,3	14,25	12,5	2,3	5,0
5	3,4	14,5	2,3	36,5	14,5	2,3	19,0	14,5	2,3	5,5
6	3,4	12,5	2,3	27,5	12,5	2,3	14,25	12,5	2,3	5,0

При выполнении данного пункта задания расчет вести для первого рупора при использовании его сначала как H -секториального, а затем как E -секториального с одним и тем же размером раскрыва по расширяющейся стороне, т.е. $(a_p)_{H\text{-сект}} = (b_p)_{E\text{-сект}}$.

Диаграмма направленности H -секториального рупора в плоскости вектора H в предположении синфазного поля в раскрыве, амплитуда которого меняется по закону косинуса, рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \frac{E(\varphi)}{E_{\max}} = \frac{1 + \cos \varphi}{2} \frac{\cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)^2}, \quad (6.12)$$

где $\frac{E(\varphi)}{E_{\max}}$ – величина относительной напряженности поля в дальней зоне; φ – угол, отсчитываемый от нормали к раскрыву рупора в плоскости H ; a_p – размер раскрыва рупора в H -плоскости; λ – длина волны генератора.

Диаграмма направленности E -секториального рупора в плоскости вектора E в предположении синфазного и равномерного амплитудного распределения поля по его раскрыву определяется по формуле

$$F(\theta) = \frac{E(\theta)}{E_{\max}} = \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin\theta}, \quad (6.13)$$

где θ – угол, отсчитываемый от нормали к раскрытию рупора в E -плоскости; b_p – размер раскрытия рупора в E -плоскости.

При расчете диаграмм направленности угол φ (или θ) изменять через $1 \dots 2^\circ$ в пределах $\pm 35^\circ$.

Ввиду симметрии формы диаграммы направленности относительно направления главного максимума ($\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$) рассчитывается только одна ее половина. Вторая половина строится как зеркальное изображение первой. Диаграммы направленности построить в декартовой системе координат на двух отдельных рисунках.

Ширину ДН в H -плоскости для косинусоидального амплитудного распределения рассчитать по формуле

$$2\varphi_{0,7} = 68^\circ \frac{\lambda}{a_p}, \text{ град.} \quad (6.14)$$

Соответственно ширину ДН в E -плоскости при равномерном амплитудном распределении найти по соотношению

$$2\theta_{0,7} = 51^\circ \frac{\lambda}{b_p}, \text{ град.} \quad (6.15)$$

2. Рассчитать коэффициент направленного действия D рупоров № 1, 2 и 3 при использовании их в качестве H - и E -секториальных рупоров соответственно.

При вычислении использовать графики на рис. 6.7 и 6.8, показывающие зависимость КНД от размеров H - и E -секториальных рупоров. Графики построены для случая, когда отношение наименьшего размера рупора к длине

волны $\frac{b_p}{\lambda}$ (для H -секториального) или $\frac{a_p}{\lambda}$ (для E -секториального) равно

единице. Если же $\frac{b_p}{\lambda} \neq 1$ (или $\frac{a_p}{\lambda} \neq 1$), то полученное из соответствующего

графика значение КНД следует умножить на отношение $\frac{b_p}{\lambda}$ (или $\frac{a_p}{\lambda}$).

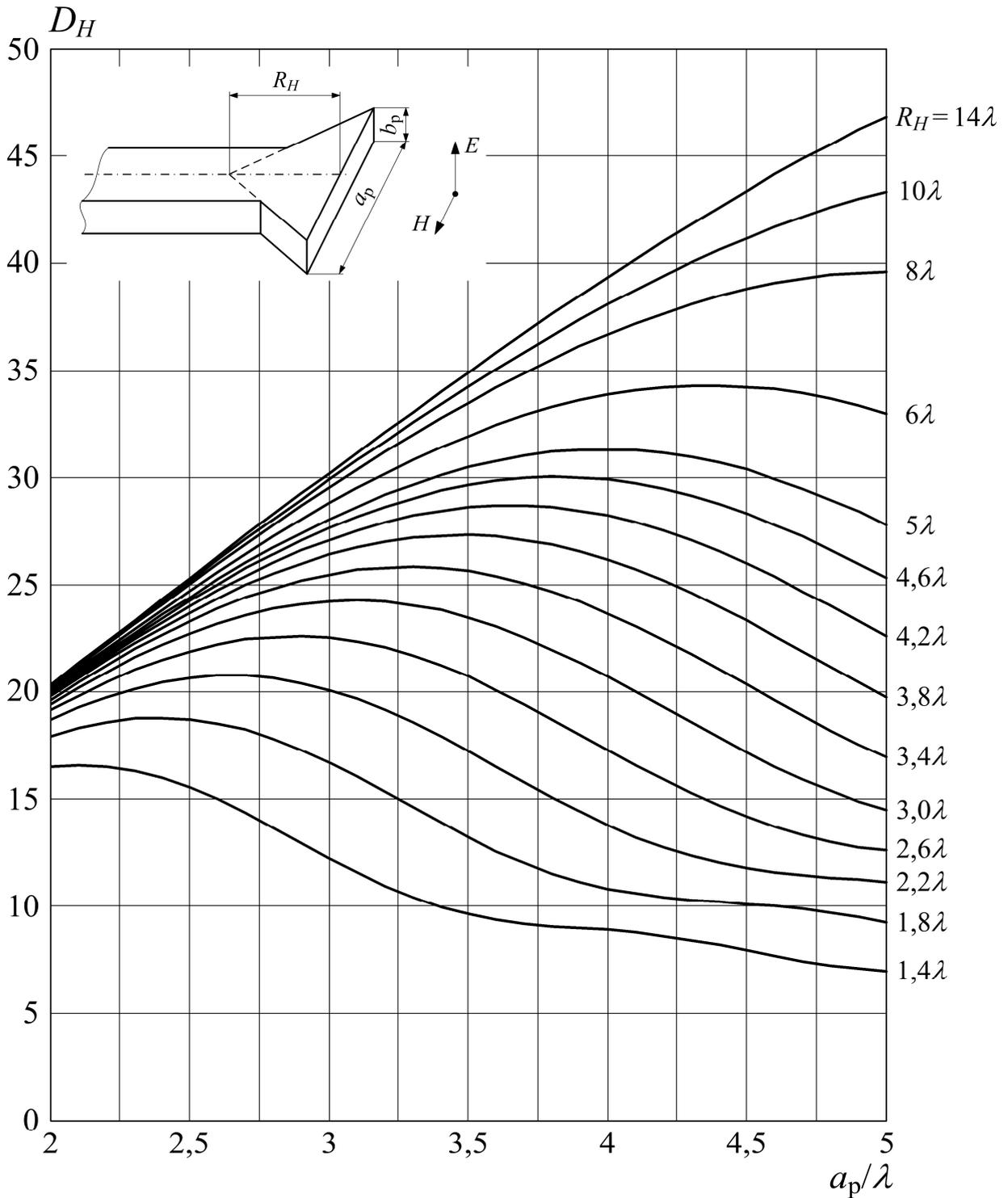


Рис. 6.7. Коэффициент направленного действия H -секториального рупора в зависимости от его размеров

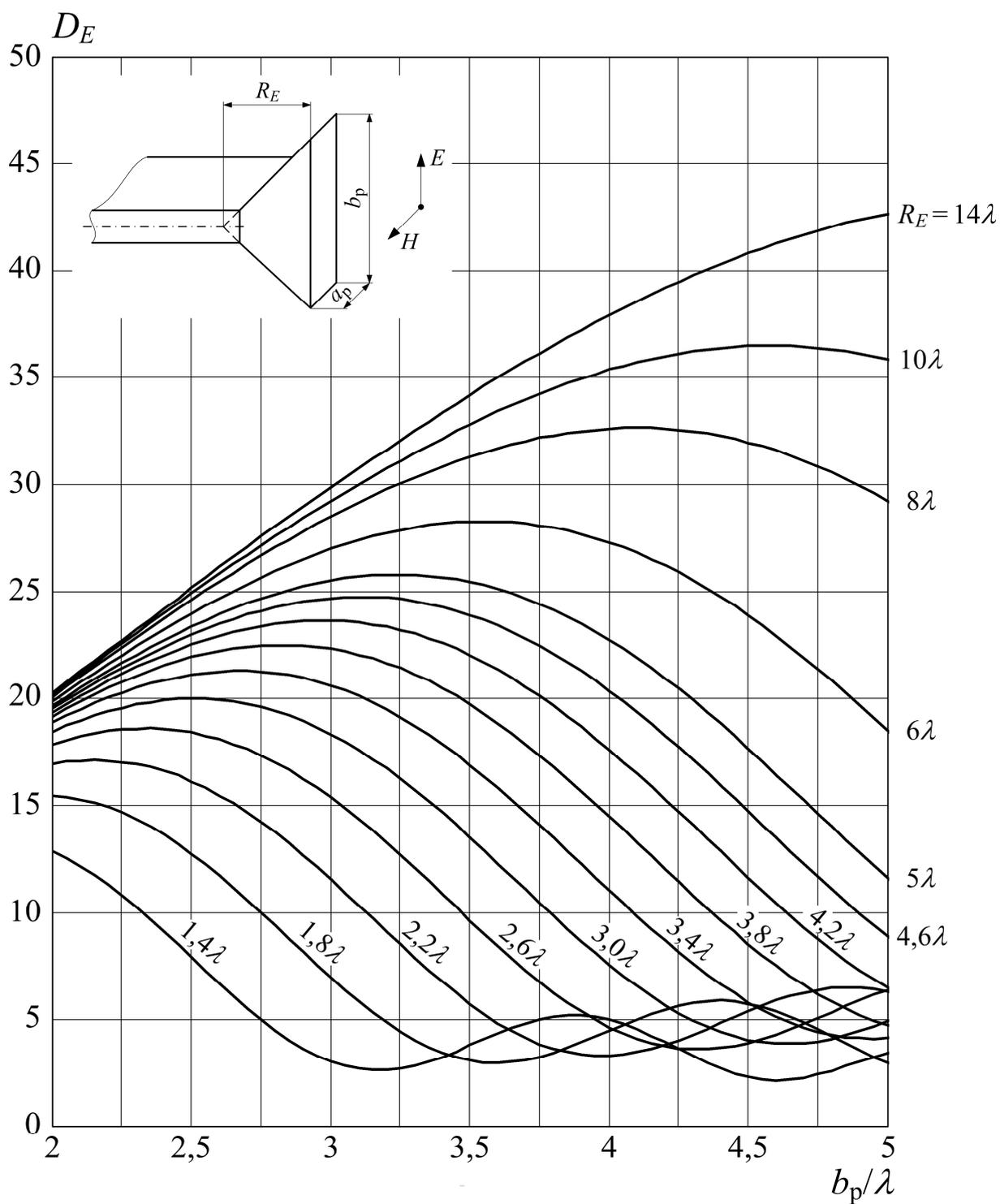


Рис. 6.8. Коэффициент направленного действия E -секториального рупора в зависимости от его размеров

3. Рассчитать максимальную фазовую ошибку в раскрывах H - и E -секториальных рупоров № 1, 2 и 3 и сравнить полученные результаты с допустимой величиной.

Максимальный сдвиг фазы поля в раскрыве рупора длиной R относительно его середины (или максимальная фазовая ошибка) на краях раскрыва рупора рассчитывается по формулам

- для H -секториального рупора

$$\Delta\psi_{H_{\max}} = \frac{\pi a_p^2}{4 \lambda R}; \quad (6.16)$$

- для E -секториального рупора

$$\Delta\psi_{E_{\max}} = \frac{\pi b_p^2}{4 \lambda R}. \quad (6.17)$$

Допустимые отклонения фазы в раскрыве для H - и E -секториальных рупоров составляют $\frac{3}{4}\pi$ и $\frac{\pi}{2}$ соответственно.

Экспериментальная часть

Описание установки и ее схема

Лабораторная установка позволяет снимать диаграммы направленности различных рупорных антенн. Электрическая схема установки представлена на рис. 6.9. При снятии диаграммы направленности исследуемые антенны используются как приемные.

Лабораторная установка (рис. 6.10) для снятия диаграмм направленности состоит из металлической стойки, на которой крепится исследуемая антенна с детекторной секцией, передающего рупора (см. Приложение Б), прикрепленного с помощью кронштейна к стене, СВЧ-генератора и измерительного милливольтметра ВЗ-38.

В работе исследуются секториальные рупорные антенны и ускоряющая металлопластинчатая линза. Рупорные антенны (№1, №2, №3, рис. 6.11, табл. 6.2) отличаются друг от друга длиной рупора R при одинаковых размерах раскрыва. Следовательно, фазовые искажения в раскрыве у этих рупоров различные.

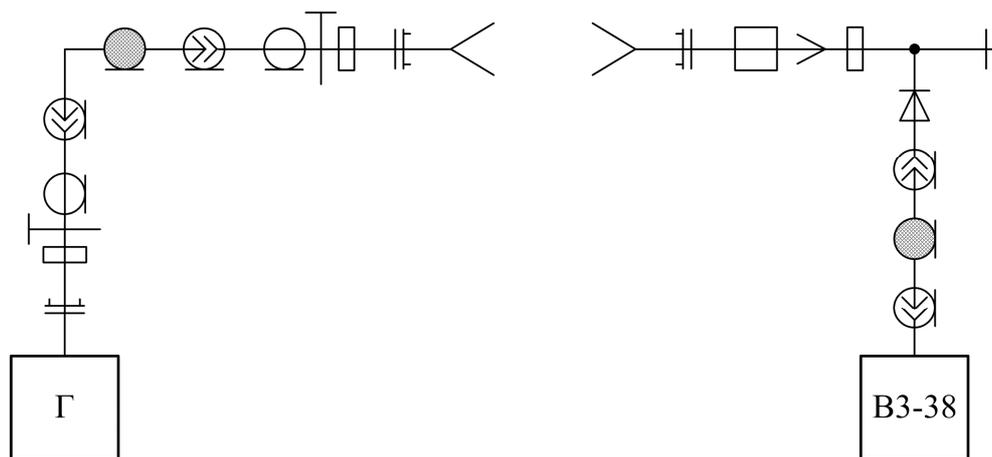


Рис. 6.9. Электрическая схема лабораторной установки

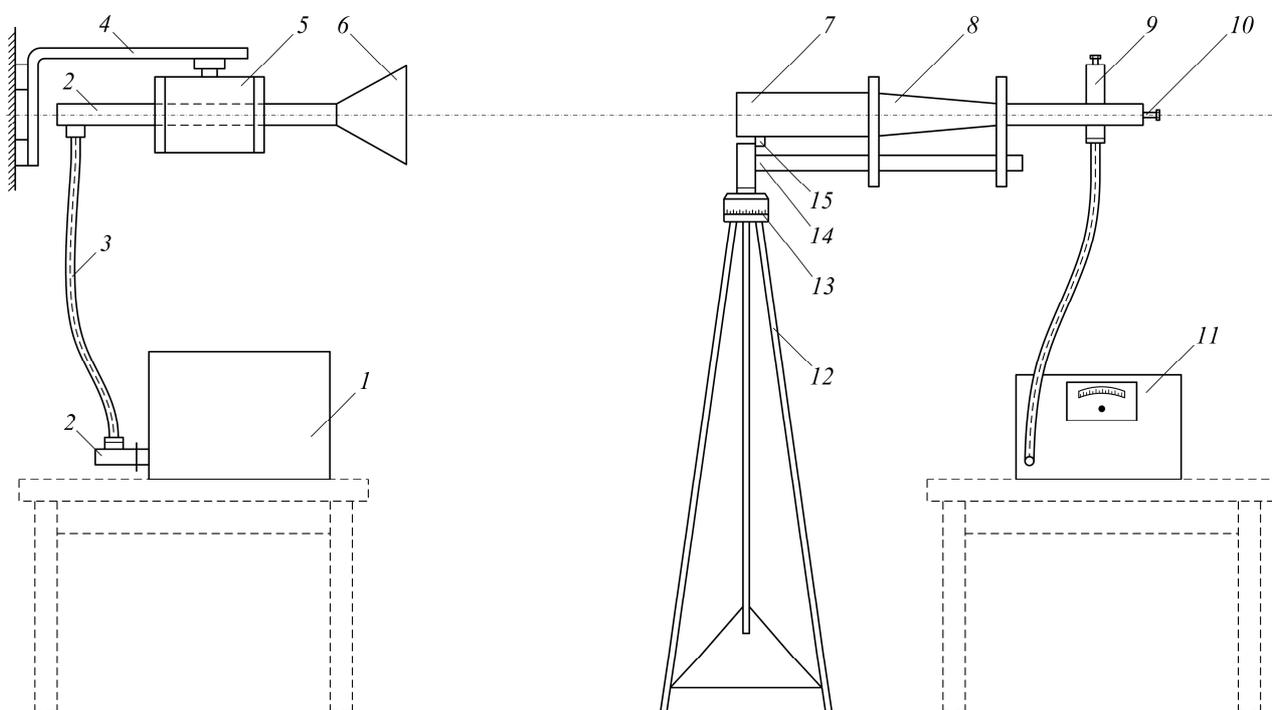


Рис. 6.10. Схема установки для исследования рупорных антенн: 1 – СВЧ-генератор; 2 – переходная секция от волновода к коаксиальному кабелю; 3 – коаксиальный кабель; 4 – кронштейн; 5 – держатель передающей антенны, 6 – пирамидальный излучающий рупор, 7 – исследуемая рупорная антенна; 8 – плавный волноводный переходник с квадратного сечения на прямоугольное; 9 – детекторная секция; 10 – винт настройки детекторной секции; 11 – измерительный прибор; 12 – стойка; 13 – шкала для отсчета углового положения антенны; 14 – направляющий кронштейн; 15 – фиксирующий выступ исследуемого рупора

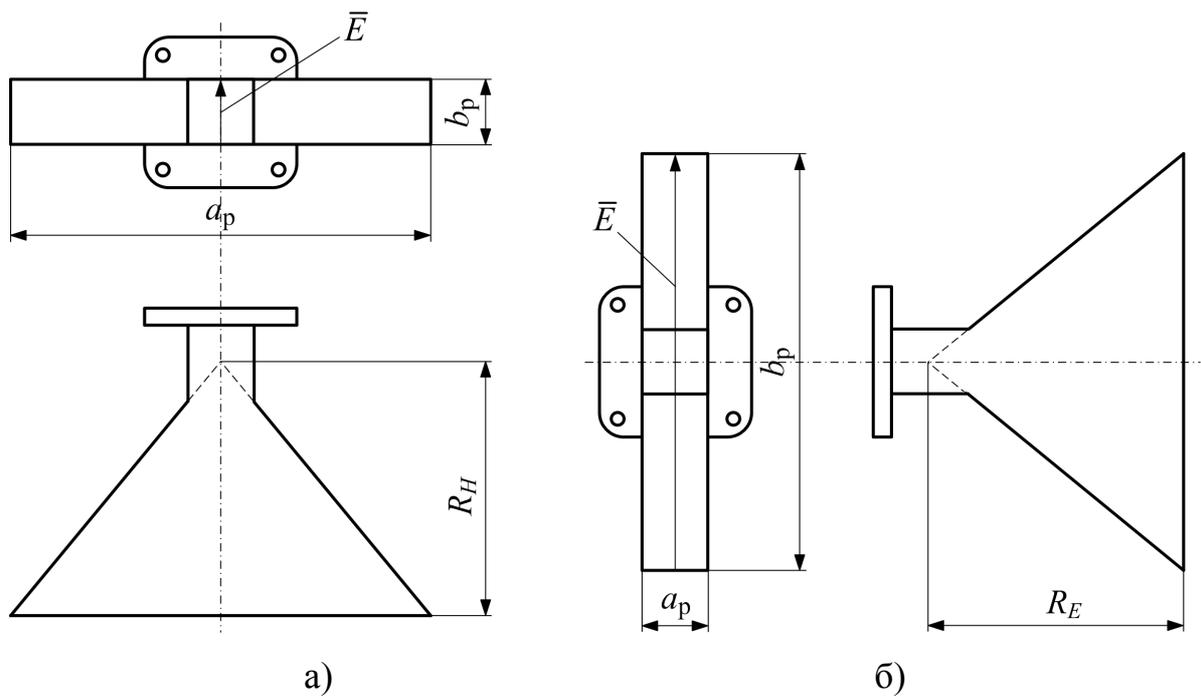


Рис. 6.11. Секториальные рупоры: *а* – *H*-секториальный; *б* – *E*-секториальный

Горловина каждого рупора имеет квадратное сечение. В связи с этим между прямоугольным волноводом детекторной секции 9 (рис. 6.10) и приемным рупором 7 включен плавный волноводный переходник 8, который имеет отверстия во фланцах и может свободно перемещаться по горизонтальному направляющему кронштейну 14, состоящему из двух параллельных металлических прутков. Отверстия во фланцах переходника расположены на двух смежных сторонах, вследствие этого переходник с детекторной секцией может быть установлен на направляющем кронштейне для приема волн либо с вертикальной, либо с горизонтальной поляризацией. Поэтому исследуемый приемный рупор при неизменном положении может быть использован как *H*-секториальный или как *E*-секториальный.

Для изменения поляризации поля излучаемой волны передающий пирамидальный рупор *б* вместе с верхней частью гибкого коаксиального кабеля 3 может поворачиваться на 90° вокруг оси рупора в держателе 5, закрепленном на стенде с помощью кронштейна 4.

Ускоряющая металлопластинчатая линза (рис. 6.12) используется для коррекции фазовых искажений в раскрыве приемного рупора. Для правильной

стыковки рупора с линзой на боковой стенке рупора имеется металлический выступ, соответствующий пазу в линзе.

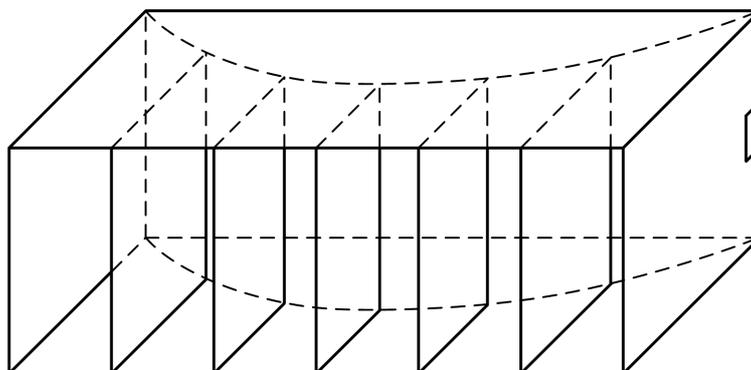


Рис. 6.12. Металлопластинчатая линза

Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать диаграмму направленности в зависимости от вида амплитудного распределения поля в раскрыве антенны.

Для этого снять диаграмму направленности рупора № 1 при использовании его сначала как *H*-секториальной, а затем – как *E*-секториальной приемной антенны.

При выполнении данного пункта к фланцу волноводного переходника 8 присоединить исследуемый рупор № 1 так, чтобы его широкая стенка находилась в плоскости широкой стенки волновода детекторной секции 9. Далее исследуемый рупор вместе с волноводным переходником 8 и детекторной секцией 9 надеть на направляющие прутки кронштейна 14 стойки 12 и довести рупор вперед по этим пруткам до упора выступа 15 снизу рупора в поперечину кронштейна. Положение исследуемого рупора № 1 и передающего рупора 6 (см. рис. 6.10) при этом должно соответствовать вертикальной поляризации излучаемого поля.

Внимание! Узкая стенка детекторной секции 9 должна всегда совпадать с узкой стенкой излучающего рупора 6.

Вращая антенну в горизонтальной плоскости, добиться максимальных показаний на милливольтметре ВЗ-38. Зафиксировать это угловое положение

антенны как начальное (нулевое). Вращая приемный рупор в азимутальной плоскости, снять диаграмму направленности для H -плоскости в диапазоне углов $\pm 70^\circ$ с шагом $2,5^\circ$.

Затем исследуемый рупор вместе с волноводным переходником и детекторной секцией снять с направляющего кронштейна. Отсоединить исследуемый рупор от волноводного переходника; волноводный переходник вместе с детекторной секцией повернуть на 90° для приема волн с горизонтальной поляризацией и опять присоединить рупор так, чтобы его широкая сторона осталась бы в горизонтальной плоскости. Рупор в сборе снова надеть на кронштейн. Для измерения поляризации поля, излучаемого антенной, передающий рупор $б$ повернуть в держателе 5 на 90° .

Снять диаграмму направленности в E -плоскости для E -секториального рупора, поворачивая антенну в горизонтальной плоскости в диапазоне углов $\pm 70^\circ$ с шагом $2,5^\circ$.

Данные измерений диаграммы направленности в H - и E -плоскостях занести в табл. 6.3. По полученным данным построить нормированные диаграммы направленности по напряженности поля на тех же рисунках, где имеются теоретически рассчитанные диаграммы направленности. По экспериментальным кривым определить ширину диаграммы направленности и сравнить результаты с теоретически рассчитанными.

Таблица 6.3. Экспериментальные данные измерения диаграммы направленности для рупора № 1 в H - и E -плоскостях

Рупор № 1										
φ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_H^2(\varphi)$										
$f_H(\varphi)$										
$F_{H_норм}(\varphi)$										
θ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_E^2(\theta)$										
$f_E(\theta)$										
$F_{E_норм}(\theta)$										

2. Исследовать диаграмму направленности рупоров в зависимости от величины фазовых ошибок в раскрыве для двух видов амплитудного распределения.

Для этого снять диаграммы направленности для рупоров № 2 и № 3 в H - и E -плоскостях согласно методике, изложенной в п. 1, занеся полученные данные в табл. 6.4. При выполнении данного эксперимента, как и предыдущего, исследуемый рупор вместе с волноводным переходником 8 доводить по пруткам направляющего кронштейна 14 вперед до упора выступа 15 снизу рупора в поперечину кронштейна.

Таблица 6.4. Экспериментальные данные измерения диаграммы направленности для рупоров № 2 и № 3 в H - и E -плоскостях

Рупор № 2										
φ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_H^2(\varphi)$										
$f_H(\varphi)$										
$F_{H_норм}(\varphi)$										
θ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_E^2(\theta)$										
$f_E(\theta)$										
$F_{E_норм}(\theta)$										
Рупор № 3										
φ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_H^2(\varphi)$										
$f_H(\varphi)$										
$F_{H_норм}(\varphi)$										
θ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_E^2(\theta)$										
$f_E(\theta)$										
$F_{E_норм}(\theta)$										

По полученным данным в декартовой системе координат построить четыре нормированные диаграммы направленности для рупоров № 2 и № 3 («по полю») в H - и E -плоскостях. На одном рисунке привести диаграммы направленности в H -плоскости, а на другом – в E -плоскости.

По экспериментальным графикам сравнить диаграммы направленности рупоров № 1, № 2, № 3 и сделать выводы, к каким изменениям в диаграмме направленности приводят фазовые ошибки в раскрыве рупора (H - и E -секториального); связать эти изменения с видом амплитудного распределения поля в раскрыве рупора.

3. Исследовать влияние корректирующей металлопластинчатой линзы на диаграмму направленности рупорной антенны.

Для этого снять диаграмму направленности рупора № 3 с металлопластинчатой линзой, занося данные в табл. 6.5. Для обеспечения точного положения линзы на боковой стенке рупора № 3 имеется металлический выступ, а в линзе паз, при совпадении которых линза свободно надевается на рупор. Приемный и передающий рупора использовать как H -секториальные.

Таблица 6.5. Экспериментальные данные измерения диаграммы направленности для рупора № 3 с корректирующей металлопластинчатой линзой в H -плоскости

Рупор № 3 с корректирующей металлопластинчатой линзой										
φ , град	-70	...	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	...	70
$f_H^2(\varphi)$										
$f_H(\varphi)$										
$F_{H_норм}(\varphi)$										

По полученным данным в декартовой системе координат построить нормированную диаграмму направленности «по полю» и сравнить ее с

диаграммами направленности рупоров, полученных в результате выполнения п.1 и п.2 эксперимента, в той же плоскости. По этим данным сделать заключение о величине фазовой ошибки в раскрыве рупора № 3 с линзой.

Требования к отчету

Оформление отчета должно отвечать требованиям, изложенным в разделе «Правила оформления отчета». В отчете должны быть представлены:

- 1) цель работы и электрическая схема лабораторной установки;
- 2) таблицы с теоретически рассчитанными и экспериментальными данными для построения диаграмм направленности исследуемых антенн; формулы для расчета диаграммы направленности;
- 3) графики с теоретически рассчитанными и экспериментальными диаграммами направленности исследуемых антенн;
- 4) расчетные данные по КНД и ширине диаграммы направленности исследуемых антенн;
- 5) выводы по каждому пункту работы и по всей работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы рупорных антенн и поясните принцип их действия.
2. Какова структура поля внутри секториальных и пирамидальных рупоров?
3. От чего зависит и как меняется фазовая скорость волны в $H(E)$ -секториальном рупоре?
4. По какому закону изменяется фаза по раскрыву рупора и от каких параметров рупора она зависит?
5. Какова величина максимально допустимых фазовых искажений (фазовых ошибок) в H - и E -секториальных рупорах?
6. Как зависит диаграмма направленности антенны с плоским раскрывом от амплитудного и фазового распределения поля по ее раскрыву?

7. Каков закон амплитудного распределения поля в раскрыве H - и E -секториальных рупоров и чем он определяется?
8. При каких допущениях выведены формулы для расчета диаграмм направленности рупорной антенны в H - и E -плоскостях [см. формулы (6.12) и (6.13) расчетной части]?
9. Какие рупорные антенны считаются оптимальными?
10. Сравните диаграммы направленности двух секториальных рупоров с одинаковым раскрывом, но с различной длиной R .
11. Как можно скорректировать фазовые искажения в раскрыве рупорных антенн?
12. Поясните принцип действия металлопластинчатой линзовой антенны.
13. Какими параметрами определяется коэффициент преломления металлопластинчатой линзы; диэлектрической линзы?
14. Как выбирается в антенне коэффициент преломления металлопластинчатой линзы?
15. Что такое коэффициент направленного действия и коэффициент усиления рупорной антенны? Как определить эти коэффициенты?
16. Почему рупорные антенны не применяют для создания остронаправленного излучения?
17. Оцените ширину диаграммы направленности и коэффициент усиления антенны с раскрывом 10×10 см, работающей на волне $\lambda = 1$ см (допуская, что фазовое распределение не имеет ошибок).

Приложение А. Определение характеристик направленности антенны

Снятие диаграммы направленности

Величина напряженности поля, излучаемого антенной, зависит от положения точки наблюдения. Функциональное описание этой зависимости производят в сферической системе координат (R, θ, φ) , центр которой находится в электрическом центре антенны. Для дальней зоны, т.е. на расстояниях R , во много раз больших рабочей длины волны λ и наибольшего излучающего размера антенны D , величину напряженности поля можно описать формулой

$$E = \frac{E_{\max}}{R} F(\theta, \varphi). \quad (\text{A.1})$$

Функцию $F(\theta, \varphi)$, описывающую зависимость амплитуды поля от угловых координат, называют амплитудной характеристикой направленности антенны, или сокращенно – характеристикой направленности антенны. Графическое изображение характеристики направленности называют диаграммой направленности.

Амплитудные диаграммы направленности (например, в плоскости угла θ) строят как в полярной, так и в прямоугольной системе координат (рис. А.1), по модулю. Вопрос о том, в какой системе координат строить диаграмму направленности, определяет ее ширина. Для широких диаграмм направленности (примерно 30° и более) наглядней изображение получается в полярной системе координат, а для узких диаграмм направленности – в прямоугольной.

Довольно часто при построении диаграммы направленности в любой системе координат возникает задача точного изображения относительно малого уровня боковых лепестков. В этом случае для отсчета величины $F(\theta, \varphi)$ применяют логарифмический масштаб.

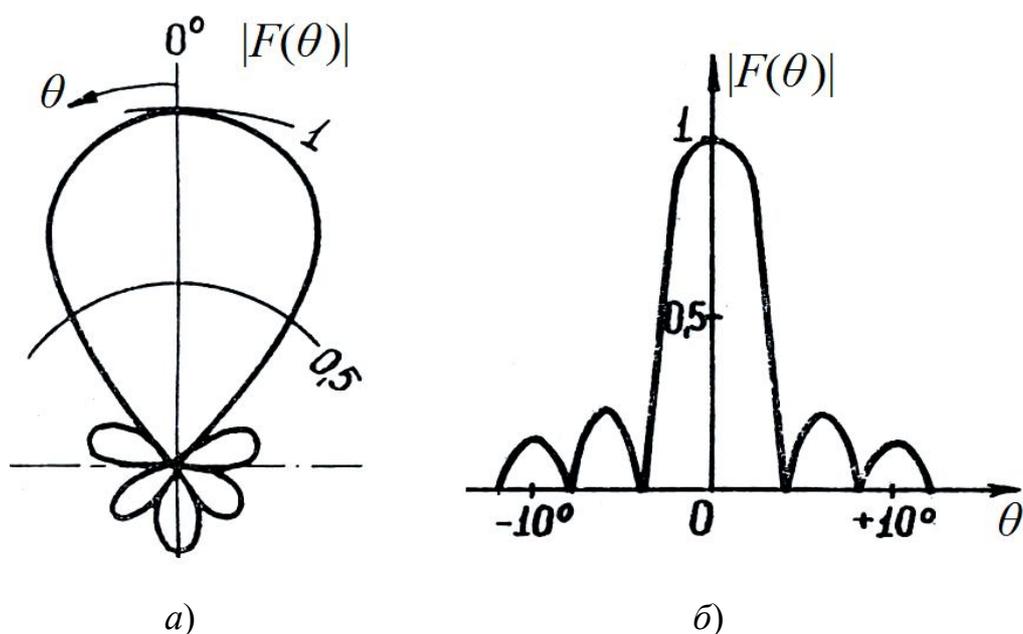


Рис. А.1. Амплитудные диаграммы направленности:

а – в полярной системе координат; б – в прямоугольной системе координат

При работе антенны в режиме приема характеристика направленности описывает изменение напряжения (или тока) на входе антенны в зависимости от направления прихода электромагнитной волны. В соответствии с принципом взаимности характеристика направленности антенны при работе на передачу и прием одна и та же. Это обстоятельство позволяет снимать диаграмму направленности антенны в режиме передачи или приема в зависимости от того, что более удобно.

Для снятия диаграммы направленности антенны в любом режиме необходима вторая (вспомогательная) антенна (рис. А.2). Для исследуемой антенны направление на вторую антенну меняется, а для вспомогательной антенны оно постоянно; при этом расстояние между двумя антеннами остается неизменным.

При снятии диаграммы направленности необходимо определить, с каким интервалом изменять координатный угол и на каком расстоянии располагать антенны.

Первый вопрос связан с шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны. Построение главного лепестка, а также боковых

лепестков диаграммы направленности следует производить по достаточному числу экспериментальных точек.

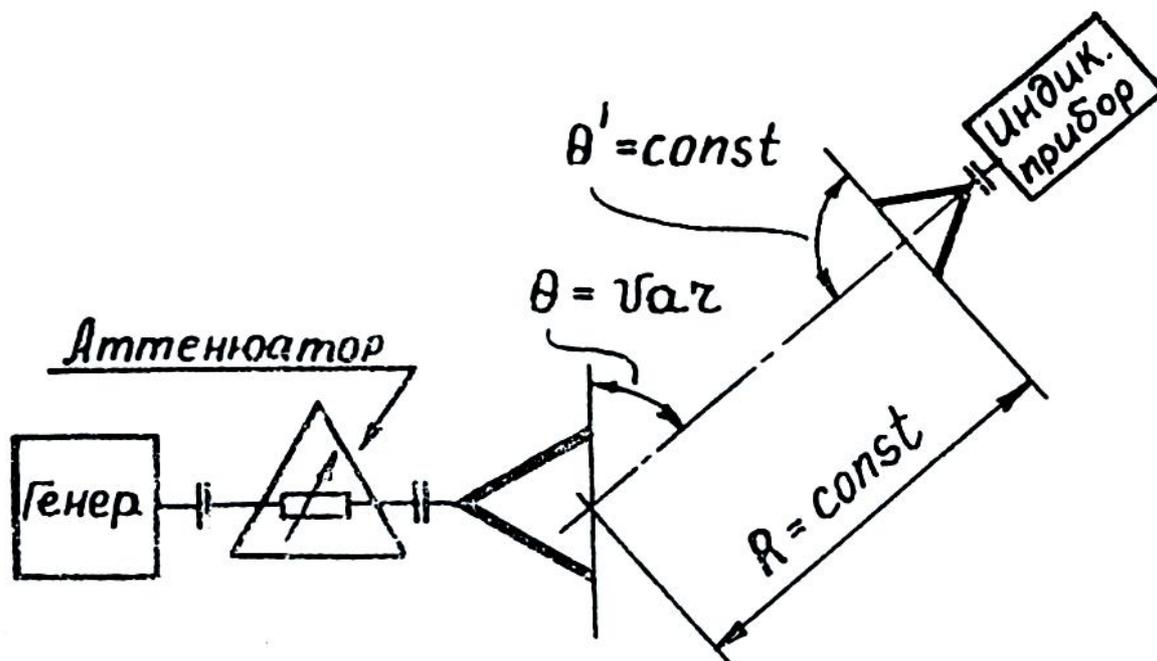


Рис. А.2. Схема установки для снятия диаграммы направленности

Для наиболее точного построения диаграммы направленности в пределах главного лепестка необходимо иметь 12...16 экспериментально полученных точек. Для этого в начале эксперимента производят предварительное определение ширины главного лепестка «по нулям», и $\frac{1}{12} \dots \frac{1}{16}$ этой величины укажет на максимальный интервал изменения угла θ . Положение нулей диаграммы направленности при эксперименте фиксируют по возможности точнее.

Интервал изменения угла $\Delta\theta$ до эксперимента приближенно можно оценить по формулам, поскольку обычно размер излучающего раскрыва D антенны и рабочая длина волны λ известны. Ширину луча большинства антенн по нулевому уровню определяют по формуле

$$2\theta_0 \approx 120 \frac{\lambda}{D}, \text{ град.} \quad (\text{А.2})$$

Следовательно, интервал изменения угла $\Delta\theta_0 \leq 10 \frac{\lambda}{D}$.

Выбор необходимого расстояния между антеннами связан с фазовой и амплитудной ошибками в их раскрывах. Вследствие сферичности фронта волны, излученной антенной с размером раскрыва d (рис. А.3,а), раскрыв D приемной антенны будет возбуждаться несинфазно. В случае, когда размер раскрыва одной антенны намного больше размера раскрыва другой антенны ($D \gg d$), амплитудную ошибку можно не учитывать. Фазовая ошибка будет допустимой (меньше $\pi/8$), если расстояние между антеннами выбрать из соотношения

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (\text{A.3})$$

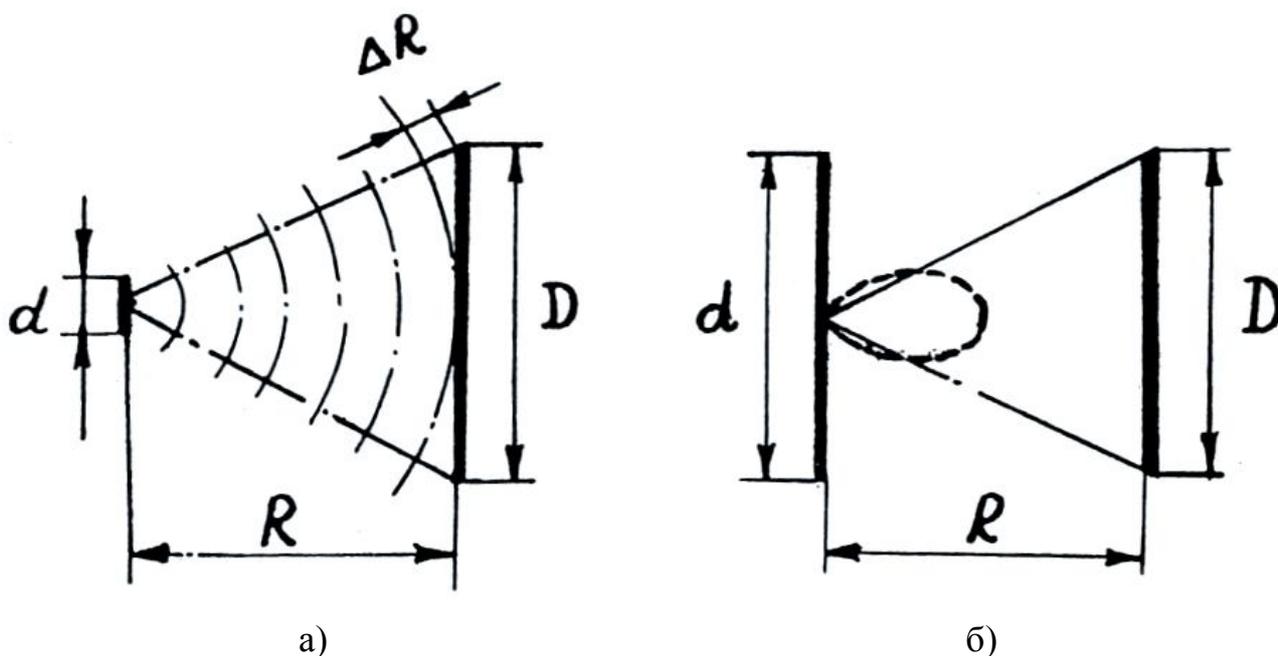


Рис. А.3. Схема для определения расстояния между антеннами при измерении диаграммы направленности: *а* – с учетом только фазовой ошибки; *б* – с учетом только амплитудной ошибки

В случае антенн с соизмеримыми размерами раскрывов к фазовой ошибке добавляется еще амплитудная ошибка. Последняя возникает вследствие того, что равномерность возбуждения раскрыва приемной антенны зависит от ширины диаграммы направленности передающей антенны (рис. А.3,б). Влияние указанных ошибок становится незначительным, если диаграмму направленности снимать на расстоянии

$$R \geq \frac{2(D+d)^2}{\lambda}. \quad (\text{A.4})$$

При измерениях диаграммы направленности антенн надо иметь в виду, что характеристики детекторов, применяемых в индикаторных приборах, нелинейны. В первом приближении характеристики кристаллических детекторов можно считать квадратичными, и тогда данные индикаторных приборов будут соответствовать диаграммам направленности «по мощности», т.е. $F^2(\theta, \varphi)$.

При точных измерениях диаграммы направленности влияние нелинейности характеристики детектора можно избежать за счет применения градуированного аттенюатора (рис. А.2), включенного в любое место высокочастотного тракта установки. В этом случае измерения уровня сигнала ведутся путем изменения затухания, вносимого аттенюатором. Перед измерениями вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума диаграммы направленности исследуемой антенны. Регулировка аттенюатора состоит в установке его в положение максимального затухания, величина которого определяется чувствительностью принимаемой аппаратуры и удобным положением стрелки индикаторного прибора. При снятии диаграммы направленности за счет уменьшения затухания аттенюатора стрелка индикаторного прибора возвращается к первоначальному положению. Данные об измерении уровня сигнала считываются со шкалы градуированного аттенюатора (с учетом градуировочного графика) в децибелах, которые затем можно пересчитать в относительные величины. При таком способе измерения диаграммы направленности рабочий режим детектора неизменен и вид его характеристики не имеет значения.

Измерение коэффициента усиления антенн

Для измерения коэффициента усиления (КУ) антенн с применением эталонной антенны используют ту же схему установки, что и для снятия диаграммы направленности. Минимально допустимое расстояние между

антеннами также определяется по формуле (А.4). Поскольку на КУ антенн сказываются фазовые и амплитудные ошибки в обеих плоскостях, то в формулу (А.4) необходимо подставить наибольшие размеры раскрывов антенн.

При измерении КУ вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума исследуемой антенны с неизвестным коэффициентом усиления G_x . После записи показаний индикаторного прибора α_x исследуемую антенну заменяют на эталонную с известным коэффициентом усиления $G_{эт}$. При квадратичной характеристике детектора изменения в показаниях индикаторного прибора будут прямо пропорциональны изменению КУ при перемене антенн:

$$G_x = G_{эт} \frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}, \quad (A.5)$$

где $\alpha_{эт}$ – показания индикаторного прибора при использовании эталонной антенны.

При применении градуированного аттенюатора измерение отношения $\frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}$ производится точнее. Поэтому при точных измерениях КУ предпочтительнее пользоваться аттенюатором. Если КУ необходимо измерить очень точно, то учитывают величины отраженных мощностей от входов исследуемой и эталонной антенн. Обычно эти отражения малы и при измерениях их не учитывают.

В качестве индикаторного прибора в лаборатории используется милливольтметр ВЗ-38.

Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38

Аналоговый милливольтметр переменного тока ВЗ-38 (рис. А.4) предназначен для измерения величины напряжения переменного тока в диапазоне 100 мкВ...300 В частотой 20 Гц...5 МГц.

В милливольтметре ВЗ-38 имеется детектор среднего значения. Шкала прибора проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального

напряжения. Прибор ВЗ-38 удобен для измерения затуханий и частотных характеристик по шкале, проградуированной в децибелах (0 дБ – 0,775 В).



Рис. А.4. Милливольтметр ВЗ-38 (передняя панель)

Предел допускаемой основной погрешности прибора, выраженный в процентах от верхнего предела установленного поддиапазона измерения, равен $\pm 2,5\%$. Входная емкость: 30 пФ (1...300 мВ) и 15 пФ (1...300 В). Входное сопротивление: 5 МОм (1...300 мВ) и 4 МОм (1...300 В).

На его передней панели имеются:

- стрелочный прибор, по положению стрелки которого отсчитывается входное напряжение;
- входной разъем для подачи измеряемого напряжения;
- переключатель пределов измерения напряжения;
- выключатель сети и индикатор включения.

Для начала работы необходимо включить прибор в сеть, щёлкнуть вверх сетевым выключателем и дать прибору прогреться 5 минут.

Устанавливаем переключатель пределов на значение, немного превышающее предполагаемую величину измеряемого напряжения. Например, если планируется измерять напряжение примерно 1...2 В, ставим переключатель на «3 V» (как на рис. А.4).

Важно! Предел измерения прибора обозначает величину напряжения, подаваемого на вход, при котором стрелка прибора отклонится до максимального (крайнего правого) положения.

Подаём на вход прибора измеряемое напряжение. Стрелка его отклонится и покажет величину поданного напряжения. Если стрелка ушла вправо за границу шкалы (зашкалила), то входное напряжение больше установленного предела, нужно переключатель пределов переключить на больший предел; если стрелка отклонилась меньше, чем четверть шкалы, то нужно переключиться на меньший предел, иначе будет велика погрешность измерения.

По какой шкале производить отсчёт? Верхняя шкала имеет деления до 10, по ней удобно измерять на пределах, кратных 10; средняя шкала имеет деления до 30, по ней удобно измерять на пределах, кратных 3. На нижнюю шкалу для ясности не будем обращать внимания – для лабораторных работ она не требуется.

На рис. А.4 переключатель пределов стоит в положении «3 V», значит, считывать показания будем по средней шкале. По ней стрелка максимально может отклониться до числа 30 при входном напряжении 3 В, т.е. значение, которое стрелка показывает на средней шкале (рис. А.4), нужно разделить на 10. Тогда получим величину измеряемого напряжения. В нашем случае стрелка показывает «21», считаем: $21/10 = 2,1$ В.

Приложение Б. Вспомогательная рупорная антенна

Основным элементом рупорной антенны является стандартный пирамидальный рупор с размерами раскрыва 90×135 см, длиной 160 см, с входным волноводом сечением 23×10 мм на длине волны 3,2 см, коэффициент усиления рупора равен примерно 90.

Высокочастотная энергия от генератора к антенне подается с помощью гибкого коаксиального кабеля с волноводным выходом сечением 23×10 мм. Вспомогательная рупорная передающая антенна имеет два варианта крепления к стене (рис. Б.1 и рис. Б.2).

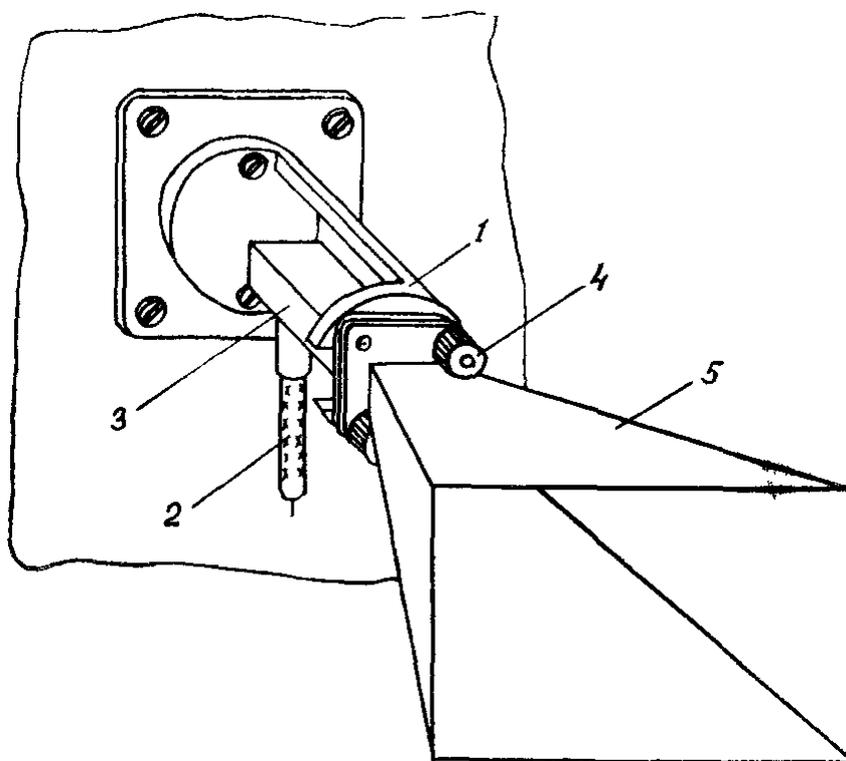


Рис. Б.1. Первый вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:

1 – втулка, укрепленная на стене; *2* – гибкий коаксиальный кабель; *3* – волноводный выход кабеля; *4* – крепежные гайки; *5* – пирамидальный рупор

Варианты рупорной антенны отличаются друг от друга конструкцией узла крепления. В первом варианте (рис. Б.1) фланец рупора и фланец волноводного выхода коаксиального кабеля посажены на двух шпильках неподвижной втулки, укрепленной на стене. В этом варианте для изменения плоскости

поляризации излученного поля на 90° необходимо отвернуть две круглые с накаткой крепежные гайки, снять оба волноводных фланца со шпилек, и после их поворота вокруг продольной оси на 90° надеть другими отверстиями на шпильки и затянуть крепежными гайками.

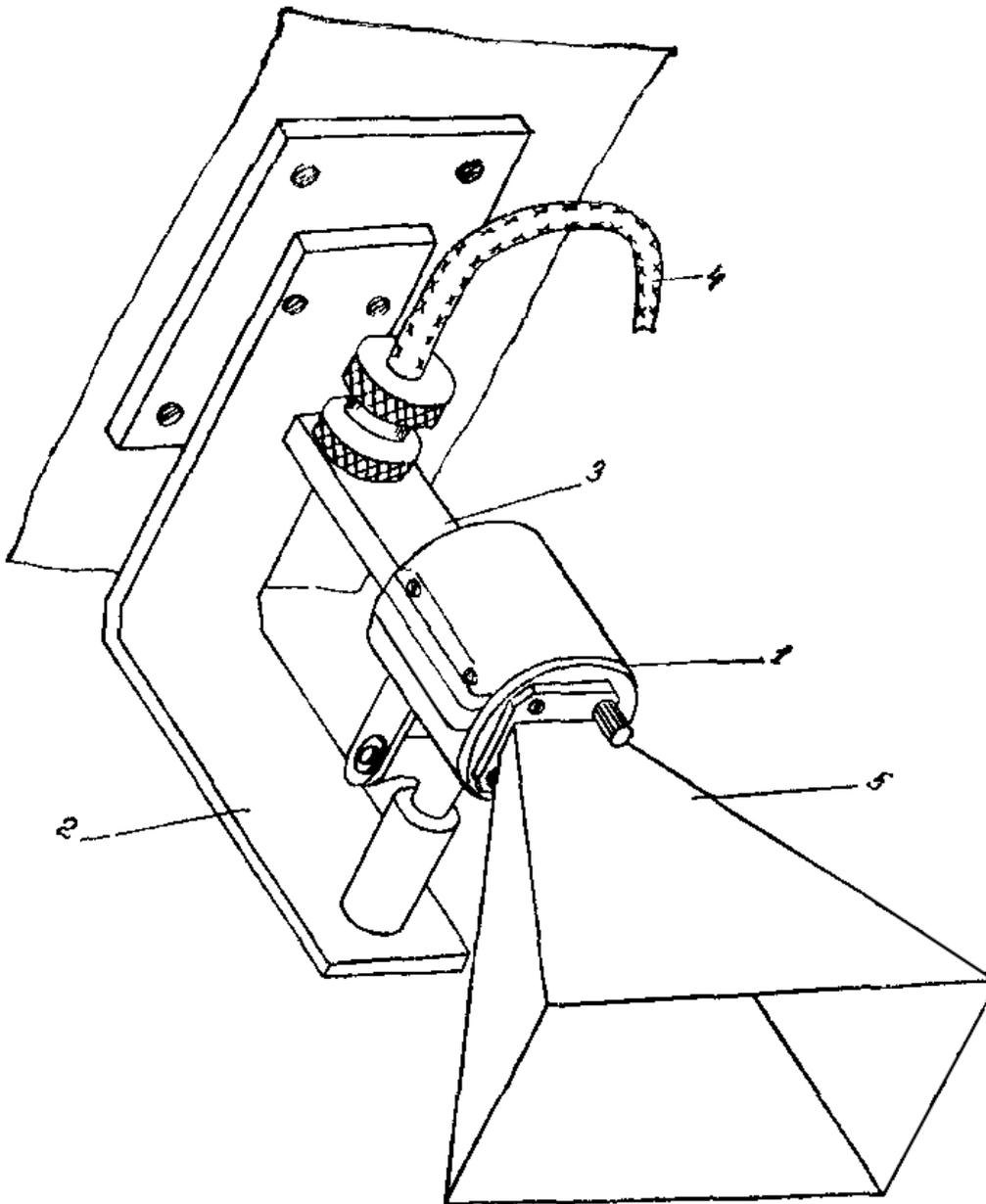


Рис. Б.2. Второй вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:
1 – головка с вращающейся втулкой; 2 – кронштейн, укрепленный на стене;
3 – волноводный выход гибкого коаксиального кабеля; 4 – гибкий коаксиальный кабель; 5 – пирамидальный рупор

Во втором варианте антенны (рис. Б.2) рупор и волноводный выход коаксиального кабеля посажены на шпильки вращающейся втулки специальной головки. В данном варианте для изменения плоскости поляризации излучаемого поля на 90° необходимо сам рупор с некоторым усилием повернуть на четверть оборота. Вращающаяся втулка головки через каждые четверть оборота стопорится специальными пружинными фиксаторами с западающими шариками.

Содержание

Работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНЫХ АНТЕНН И МЕТАЛЛОПЛАСТИНЧАТОЙ ЛИНЗЫ	2
Цель работы.....	2
Теоретическая подготовка к работе	2
Расчетные задания и расчетные формулы	18
Экспериментальная часть	23
Описание установки и ее схема	23
Порядок выполнения эксперимента	26
Требования к отчету	30
Контрольные вопросы.....	30
Приложение А. Определение характеристик направленности антенны	32
Снятие диаграммы направленности	32
Измерение коэффициента усиления антенн.....	36
Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38	37
Приложение Б. Вспомогательная рупорная антенна	40

Литература

-
- 1 Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. и др. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника. 2016.
 - 2 Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио. 1974.
 - 3 Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио. 1974.
 - 4 Жук М.С., Молочков Ю.В. Проектирование антенно-фидерных устройств. М.: Энергия. 1966.