

4. АНТЕННЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН

4.1. Антенна типа «волновой канал»

4.1. Описать схему директорной антенны (типа «волновой канал») и принцип получения в ней однонаправленного излучения. Почему в антенну «волновой канал» (рис. 4.1) вводят несколько директоров (D_1, D_2, D_3) и только один рефлектор (P)?

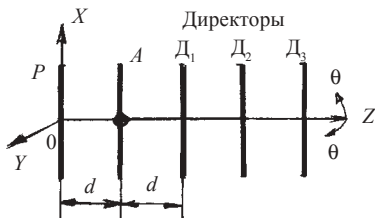


Рис. 4.1

4.2. Рассмотреть антенну типа «волновой канал» как линейную решетку бегущей волны с замедленной фазовой скоростью и осевым излучением. С помощью ДН и векторных диаграмм показать, что рефлектор должен обладать реактивным сопротивлением индуктивного характера, а директор – емкостного.

4.3. Написать и обосновать формулы КНД и ширины ДН директорной антенны. Отметить ее достоинства, недостатки и области применения.

4.4. Антенна типа «волновой канал» состоит из активного вибратора, рефлектора и трех директоров и имеет общую длину $l_A = 6$ м. Длина волны $\lambda = 6$ м. Определить КНД антенны D.

4.5. Рассчитать ДН в E- и H-плоскостях линейной системы излучателей, состоящей из двух параллельных симметричных вибраторов длиной $2l = \lambda/2$, расположенных на расстоянии $d = \lambda/4$ друг от друга и питаемых токами одинаковой амплитуды, но со сдвигом по фазе $\psi = \pi/2$ (система антенна-рефлектор).

Решение. КНД антенны типа «волновой канал» с оптимальной длиной l_A рассчитывается по формуле

$$D \approx k_1 \frac{l_A}{\lambda} \approx \frac{7 \cdot 6}{6} = 7,$$

где $k_1 = 5-10$, коэффициент, зависящий от числа вибраторов.

Решение. ДН линейной системы излучателей по теореме перемножения определяется произведением функции направленности одного излучателя $f_1(\theta)$ на множитель решетки $f_n(\theta)$ из n излучателей. Используя данные задачи, получим выражения для множителя решетки:

$$f_{n=2}(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{n}{2}(kd \cos\theta - \psi)\right]}{n \sin\left[\frac{1}{2}(kd \cos\theta - \psi)\right]} =$$

$$= \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(\cos\theta - 1)\right]}{2 \sin\left[\frac{\pi}{4}(\cos\theta - 1)\right]} = \cos\left[\frac{\pi}{4}(1 - \cos\theta)\right]; \quad (4.1)$$

здесь $kd = \frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} = \psi$.

Диаграмма направленности вибратора в E -плоскости рассчитывается по выражению

$$f_{1E}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right)}{\cos\theta}. \quad (4.2)$$

Поскольку ДН вибратора в H -плоскости определяется выражением $f_{1H}(\theta) = 1$, вибратор излучает во все стороны равномерно, то выражение (4.1) соответствует функции направленности системы А-Р в H -плоскости.

Расчет функции направленности по выражению (4.1) приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

θ°	0	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{n=2}(\theta)$	1	0,999	0,994	0,983	0,961	0,924	0,869	0,797	0,707

Окончание табл. 4.1

θ°	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$f_{n=2}(\theta)$	0,604	0,494	0,383	0,277	0,183	0,105	0,047	0,012	0

Расчет функции направленности вибратора по выражению (4.2) приведен в табл. 4.2.

Таблица 4.2

θ°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{1E}(\theta)$	1	0,98	0,92	0,82	0,69	0,56	0,42	0,28	0,13	0

θ^0	0	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{\text{л.с}}(\theta)$	1	0,913	0,812	0,683	0,537	0,386	0,24	0,109	0

Окончание табл. 4.3

θ^0	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$f_{\text{л.с}}(\theta)$	-0,083	-0,136	-0,160	-0,155	-0,127	-0,086	-0,043	-0,012	0

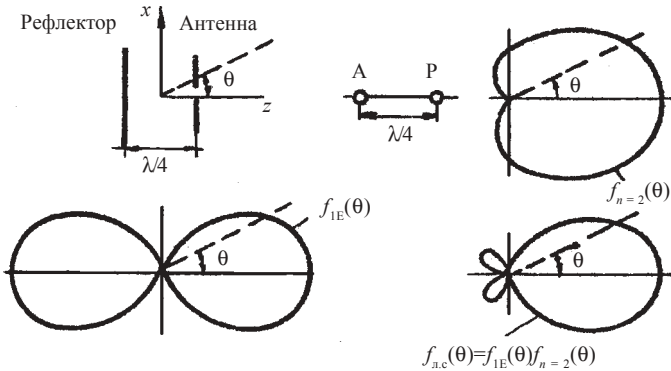


Рис. 4.2

Результаты перемножения приведенных в таблицах функций сведены в табл. 4.3 и являются искомой функцией направленности системы А-Р в E -плоскости $f_{\text{л.с}}(\theta)$. На рис. 4.2 приведен вид рассчитанных ДН.

4.2. Диэлектрические стержневые антенны

4.6. Какие антенны называются “антеннами поверхностных волн”?

Укажите составные части и режим работы этих антенн.

4.7. Описать устройство диэлектрических стержневых антенн.

4.8. Описать структуру полей и направленные свойства диэлектрической стержневой антенны. Из каких соображений диэлектрическому стержню (рис. 4.3) придают коническую форму?

4.9. Каковы оптимальные размеры и КНД диэлектрической стержневой антенны? В каких слу-

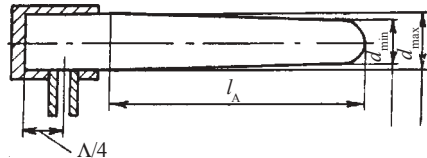


Рис. 4.3

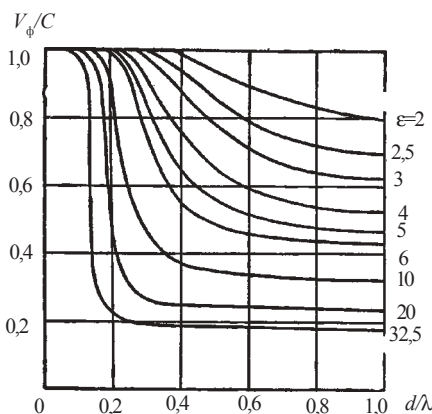


Рис. 4.4

волны λ при данном значении ϵ показана на рис. 4.4.

Решение. 1. Средний диаметр стержня

$$d_{\text{ср}} = 0,5(d_{\text{min}} + d_{\text{max}}) = 0,5(5 + 3,5) = 4,25.$$

2. По графику (см. рис. 4.4.) находим, что при $d/\lambda = 4,25/10 = 0,425$ и $\epsilon = 2,5$ отношение $V_{\phi}/C = 0,91$. Это соответствует коэффициенту за-

медления $\xi = C/V_{\phi} = 1,1$.

4.11. Определить оптимальные значения максимального и минимального диаметров диэлектрического стержня с $\epsilon = 2,3$, который излучает волны с длиной $\lambda = 12$ см.

Ответ. $d_{\text{max}} = 5,9$ см; $d_{\text{min}} = 3,7$ см.

4.12. Определить фазовую скорость V_{ϕ} волны в диэлектрической антенне оптимальных размеров и КНД антенны D_0 , если излучающий стержень имеет длину $l_A = 30$ см, длина волны $\lambda = 6$ см и $\epsilon = 2,3$.

Ответ. $V_{\phi} = 2,727 \cdot 10^8$ м/с; $D_0 \approx 37,5$.

4.13. Рассчитать диэлектрическую антенну в виде стержня оптимальных размеров и с коэффициентом усиления $G_0 \geq 30$ ($G_0 \geq 14,7$ дБ) при длине волны $\lambda = 7$ см. В процессе расчета необходимо определить: длину l_A , максимальный (d_{max}) и минимальный (d_{min}) диаметры стержня и фазовую скорость V_{ϕ} в нем; затухание, вызванное тепловыми потерями

чаях прибегают к многостержневой диэлектрической антенне?

4.10. Определить коэффициент замедления волны в диэлектрической антенне в виде стержня из полистирола ($\epsilon = 2,5$) стержня, имеющего максимальный диаметр $d_{\text{max}} = 5$ см и минимальный диаметр $d_{\text{min}} = 3,5$ см, если длина волны $\lambda = 10$ см.

Зависимость отношения фазовой скорости V_{ϕ} к скорости света C от отношения среднего диаметра стержня d к длине

в стержне; коэффициенты направленного действия; построить ДН и определить ширину ДН. При расчетах воспользуйтесь зависимостью скорости V_{ϕ} от отношения среднего диаметра стержня d к длине волны λ (рис. 4.4.).

Решение. 1. Длина стержня l_A ограничивает возможность реализации антенны. Поэтому начинаем с того, что, принимая КПД $\eta_A = 0,85$, вычисляем КНД

$$D_0 = G_0 / \eta_A = 30 / 0,85 = 35.$$

После чего, пользуясь формулой КНД антенн бегущих волн с оптимальной длиной

$$D_0 \approx (7 \div 8) \frac{l_A}{\lambda},$$

находим длину стержня оптимальных размеров

$$l_A = \frac{D_0 \lambda}{7,5} = \frac{35 \cdot 7}{7,5} = 32,6 \text{ см.}$$

Этот размер антенны можно считать приемлемым. Если же по условиям ее эксплуатации длину l_A нужно уменьшить, то следует перейти к многостержневой диэлектрической антенне.

В качестве материала для изготовления диэлектрического стержня выбираем полистироловый текстолит ($\varepsilon = 2,5$; $\text{tg} \delta = 10^{-3}$).

Максимальный диаметр стержня

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

Минимальный диаметр стержня

$$d_{\min} = 0,355 \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon - 1}} = \frac{0,355 \cdot 7}{\sqrt{2,5 - 1}} = 2 \text{ см.}$$

Так как средний диаметр равен

$$d = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} = 2,6 \text{ см,}$$

а отношение $\frac{d}{\lambda} = \frac{2,6}{7} = 0,37$, то согласно рис. 4.4., фазовая скорость в стержне равна $V_{\phi} = 0,91C = 0,91 \cdot 3 \cdot 10^8 = 2,79 \cdot 10^8$ м/с. Этой скорости соответствует коэффициент замедления $\xi = \frac{C}{V_{\phi}} = \frac{1}{0,92} = 1,1$ и длина волны в стержне $\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{\xi} = \frac{7}{1,1} = 6,3$ см.

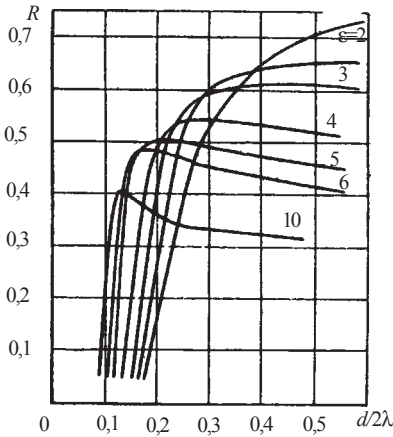


Рис. 4.5

Уточняем длину стержня l_A и находим

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

2. Определяем затухание, обусловленное тепловыми потерями в диэлектрическом стержне:

$$\alpha = 2729\epsilon \frac{R}{\lambda} \text{tg}\delta.$$

Имеющийся в формуле коэффициент R определяется по кривым, изображенным на рис. 4.5. Согласно относительной диэлектрической

проницаемости материала стержня $\epsilon = 2,5$ и отношения $\frac{d}{2\lambda} = 0,18$, получим $R = 0,18$.

Следовательно, $\alpha = 2729 \cdot 2,5 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} / 7 = 0,175$ Нп/м.

Отсюда находим КПД антенны

$$\eta_A = e^{-2\alpha l_A} \approx \frac{1}{1 + 2\alpha l_A} = \frac{1}{1 + 2 \cdot 0,175 \cdot 0,35} = 0,89.$$

КНД антенны

$$D_0 = 7,5 \frac{l_A}{\lambda} = 7,5.$$

Коэффициент усиления антенны $G_0 = D_0 \eta_A = 37,5 \cdot 0,89 = 33,4$.

3. ДН антенны рассчитываем по формуле линейной системы непрерывных излучателей

$$f(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta) \right]}{\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta)}, \quad (4.3)$$

где θ – угол между данным направлением и осью диэлектрического стержня, $\xi = C/V_{\phi} = 1,1$ – коэффициент замедления. ДН, рассчитанную по формуле (4.3), необходимо нормировать относительно максимального значения. Результаты расчета ДН приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

θ , град	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$f(\theta)_{\text{норм}}$	0,76	0,74	0,68	0,56	0,40	0,19	-0,02	-0,16	-0,22	-0,14
$f(\theta)_{\text{норм}}$	1,00	0,97	0,89	0,74	0,52	0,25	-0,03	-0,21	-0,28	-0,18

По построенной ДН определяем ее ширину на уровне 0,707 от максимального значения.

4.3. Антенны поверхностных волн

4.14. Описать устройство ребристых (гребенчатых) и плоскостных диэлектрических антенн поверхностных волн. Как замедляется фазовая скорость волн в этих антеннах?

4.15. Описать структуру электромагнитного поля поверхностной антенны. Почему волны, примыкающие к направителю антенны, называются поверхностными, а эта поверхность и сама антенна – импедансными?

4.16. Написать и обосновать уравнения для ДН в электрической и магнитной плоскостях импедансной антенны.

4.17. Отметить достоинства, недостатки и области применения импедансных антенн.

4.18. Рассчитать антенну поверхностных волн (рис. 4.6, а) с замедляющей структурой (направителем 2) в виде прямоугольных канавок при средней волне рабочего диапазона $\lambda = 3$ см и возбуждения структуры рупором 1, раскрыв которого имеет ширину $a = 30$ мм. КНД антенны D_0 должен быть не менее 34.

Решение. 1. Длина замедляющей структуры (направителя), согласно формуле

$$l_A = \frac{D\lambda_{cp}}{4 \div 8} = \frac{34 \cdot 3}{7,5} = 13,6 \text{ см.}$$

2. Оптимальный коэффициент замедления волны

$$\xi_{opt} = 1 + \frac{\lambda_{cp}}{2l_A} = 1 + \frac{3}{2 \cdot 13,6} = 1,105.$$

3. Фазовая скорость волн в замедляющей структуре

$$V_{\phi} = \frac{C}{\xi} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,105} = 2,715 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

4. Выбираем размеры ширины выступов направителя (рис. 4.6, б) s и зазора между ними t , имея в виду, что s и t не должны превышать $0,1 \lambda_{cp}$:

$$s = t = 0,05\lambda_{cp} = 0,05 \cdot 3 = 0,15 \text{ см} = 15 \text{ мм.}$$

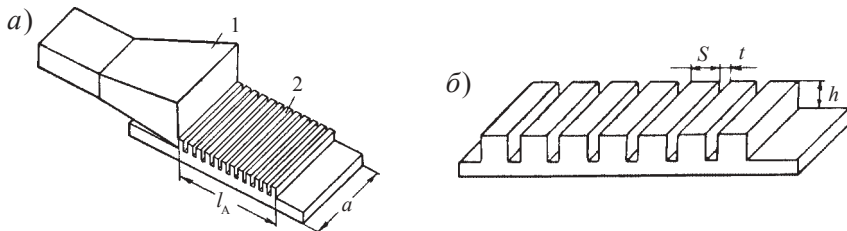


Рис. 4.6

Высоту выступов h определяем на основании формулы

$$\xi = \sqrt{1 + \left(\frac{t}{s+t}\right)^2} \operatorname{tg}^2 \beta h = \sqrt{1 + \left(\frac{t}{s+t}\right)^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{360h}{\lambda_{cp}}\right),$$

откуда

$$\operatorname{tg}^2 \left(\frac{360h}{\lambda_{cp}}\right) = \frac{\xi^2 - 1}{\left(\frac{t}{s+t}\right)^2} = \frac{1,105^2 - 1}{\left(\frac{1,5}{1,5+1,5}\right)^2} = 0,864,$$

$$\frac{360^\circ h}{\lambda_{\text{ср}}} = \operatorname{arctg} 0,9295 = 42,9^\circ; h = \frac{42,9^\circ \cdot 30}{360^\circ} = 3,6 \text{ мм.}$$

5. Рассчитываем ДН антенны в плоскости E по уравнению

$$f(\theta) = \sin \theta \frac{\sin \left[\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta) \right]}{\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta)} \quad (4.4)$$

и в плоскости H по уравнению

$$f(\theta) = \frac{\cos \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{1 - \left(\frac{2a}{\lambda} \sin \theta \right)^2} \cdot \frac{\sin \left[\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta) \right]}{\frac{\pi l_A}{\lambda} (\xi - \cos \theta)}, \quad (4.5.)$$

здесь угол θ отсчитывается от нормали к плоскости раскрыва рупора (от оси направителя).

В уравнении (4.4) первый множитель выражает направленные свойства элементарного вибратора в плоскости E , а второй – является множителем линейной непрерывной системы излучателей {см. формулу (4.3)}. В плоскости H отдельно взятый элементарный вибратор ненаправленный, но амплитуда распределяется как в рупоре – по закону косинуса. Это учтено первым множителем уравнения (4.5).

6. Строим ДН и определяем по ним ширину диаграмм $2\theta_{P/2}, 2\varphi_{P/2}$.

4.19. Определить длину l_A и коэффициент замедления ξ антенны поверхностных волн с замедляющей структурой в виде ребристой поверхности оптимальных размеров (см. рис. 4.6), если коэффициент направленного действия антенны $D_0 = 30$ при длине волны $\lambda = 5$ см.

Ответ. $l_A \approx 20$ см; $\xi = 1,125$.

4.4. Спиральные антенны

4.20. Описать устройство цилиндрической спиральной антенны и основные геометрические соотношения в ней.

4.21. Вывести условия осевого излучения волн круговой поляризации посредством цилиндрической спиральной антенны.

4.22. Описать и сравнить диапазонные свойства цилиндрической и конической спиральных антенн оптимальных размеров. Указать области применения этих антенн.

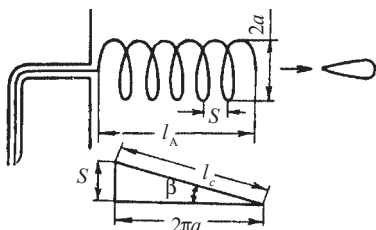


Рис. 4.7

4.23. Рассчитать цилиндрическую спиральную антенну (рис. 4.7), работающую в режиме бегущих волн в диапазоне волн $\lambda_{\min} = 6$ см, $\lambda_{\max} = 10$ см. В процессе расчета определить длину и число витков спирали, шаг намотки, коэффициент усиления и входное сопротивление антенны; построить ДН антенны и определить ее ширину.

Решение. 1. Определяем среднюю

длину волны рабочего диапазона

$$\lambda_{\text{cp}} = 0,5(\lambda_{\min} + \lambda_{\max}) = 0,5(6 + 10) = 8 \text{ см.}$$

Длину витка спирали принимаем равной средней длине волны $l_c = \lambda_{\text{cp}} = 8$ см, так как антенна должна иметь максимум излучения вдоль оси спирали.

2. Выбираем угол подъема спирали равным 15° , имея в виду, что наиболее выгодные значения этого угла $\beta = 12^\circ - 20^\circ$ (большие углы β соответствуют большей длине антенны по сравнению с длиной волны).

Определяем шаг намотки $s = l_c \sin \beta = 8 \sin 15^\circ = 8 \cdot 0,259 = 2,07$ см.

3. При вычислении длины спирали, измеренной по ее оси, исходим из того, что наиболее выгодное значение коэффициента замедления волны по этой оси на минимальной длине волны должно быть равным $\xi = C/V_c = 1,2$.

Отсюда

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

что соответствует

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

Число витков спирали

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

Округляем n до 7 и уточняем осевую длину спирали

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

4. Вычисляем коэффициент усиления антенны по низшей, средней и высшей длине волны

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

$$G_{cp} \approx D_{cp} = 15 \left(\frac{l_c}{\lambda_{cp}} \right)^2 \frac{l_A}{\lambda_{cp}} = 15 \left(\frac{8}{8} \right)^2 \frac{14,5}{8} = 27,1 = 14,3 \text{ дБ};$$

$$G_B \approx D_B = 15 \left(\frac{l_c}{\lambda_{\max}} \right)^2 \frac{l_A}{\lambda_{\max}} = 15 \left(\frac{8}{10} \right)^2 \frac{14,5}{10} = 17,4 = 11,4 \text{ дБ}.$$

5. Ширина ДН

$$2\varphi'_H = \frac{52^\circ}{\frac{l_c}{\lambda_{\min}} \sqrt{\frac{l_A}{\lambda_{\min}}}} = \frac{52^\circ}{\frac{8}{6} \sqrt{\frac{14,5}{6}}} = 25,1^\circ;$$

$$2\varphi'_{cp} = \frac{52^\circ}{\frac{l_c}{\lambda_{cp}} \sqrt{\frac{l_A}{\lambda_{cp}}}} = \frac{52^\circ}{\frac{8}{8} \sqrt{\frac{14,5}{8}}} = 38,8^\circ;$$

$$2\varphi'_B = \frac{52^\circ}{\frac{l_c}{\lambda_{\max}} \sqrt{\frac{l_A}{\lambda_{\max}}}} = \frac{52^\circ}{\frac{8}{10} \sqrt{\frac{14,5}{10}}} = 54,2^\circ.$$

6. ДН строится по уравнению

$$f(\varphi) = \frac{\sin \frac{\pi l_A}{\lambda_{cp}} (\xi_{cp} - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_A}{\lambda_{cp}} (\xi_{cp} - \cos \varphi)},$$

где $\xi_{cp} = 1 + \frac{\lambda_{cp}}{2l_A}$ соответствует средней длине волны λ_{cp} .

7. Входное сопротивление антенны

$$R_{\text{вх.н}} \approx 140 \frac{l_c}{\lambda_{\text{min}}} = 140 \cdot \frac{8}{6} = 186 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{вх.ср}} \approx 140 \frac{l_c}{\lambda_{\text{ср}}} = 140 \cdot \frac{8}{8} = 140 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{вх.в}} \approx 140 \frac{l_c}{\lambda_{\text{max}}} = 140 \cdot \frac{8}{10} = 112 \text{ Ом}.$$

4.24. Спиральная антенна с осевым излучением (см. рис. 4.7) имеет длину одного витка $l_c = 15$ см и длину спирали по ее оси $l_A = 60$ см. Определить ширину ДН $2\varphi_{0,5}$, коэффициент направленного действия D_0 и входное сопротивление антенны $R_{\text{вх.А}}$ на длине волны $\lambda = 15$ см.

Ответ. $2\varphi_{0,5} = 26^\circ$; $D_0 = 60$; $R_{\text{вх.А}} = 140$ Ом.

4.25. В чем заключается принцип электродинамического подобия, положенный в основу работы частотно-независимых антенн?

4.26. Описать построение плоской арифметической спиральной антенны и как реализуется в ней принцип электродинамического подобия.

4.27. Описать равноугольную (логарифмическую) спиральную антенну. Доказать, что в ней соблюдается принцип электродинамического подобия.

4.28. Как конструктивно выполняются арифметические и равноугольные спиральные антенны? В чем заключается принцип самодополнительности, то как проявляется это в конструкциях данных антенн и чем объясняется большая ширина их ДН?

4.29. Описать схему плоской логопериодической вибраторной антенны (ЛПА). Что называется коэффициентом подобия ЛПА? Чем определяется активная область антенны и как объясняется ее односторонняя направленность и постоянство характеристик в широком диапазоне частот?

4.30. На рис. 4.8, *а, б, в, г, д, е, ж, з* показаны варианты спиральных антенн. Указать, на каком из рисунков показаны антенны типа:

- 1) цилиндрической спирали с диаметром $2a = \lambda/\pi$; $2a \ll \lambda$; $2a > \lambda$;
- 2) плоской арифметической и плоской логарифмической спирали;
- 3) обычной конической и конической логарифмической спирали;
- 4) щелевой логарифмической спирали.

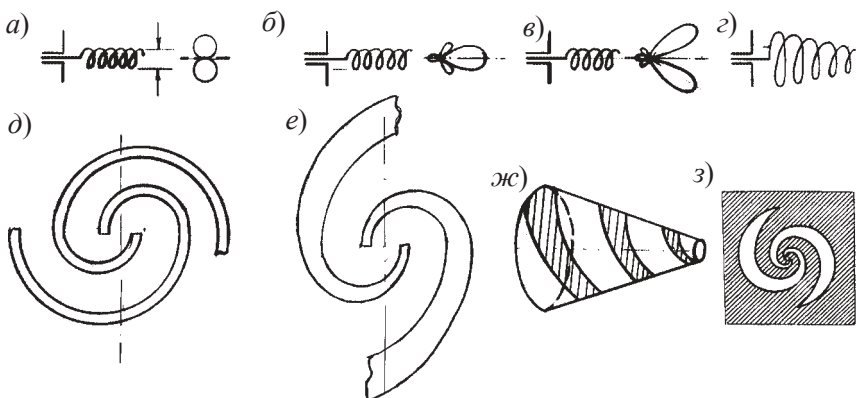


Рис. 4.8

4.31. Что ограничивает диапазон частот и каких значений достигает коэффициент перекрытия диапазона ЛПА?

4.32. Привести примеры пространственных ЛПА. Сравнить ДН в E - и H -плоскостях пространственных и плоскостных ЛПА. Указать области применения ЛПА.

4.5. Волноводно-щелевые антенны

4.33. Описать возбуждение одиночной щели в волноводе. Какие щели, прорезанные на широкой и узкой стенках прямоугольного волновода (рис. 4.9), имеют излучение максимальное, минимальное или промежуточное по значению интенсивности?

Описать, как можно интенсифицировать излучение одиночной щели или использовать ее для излучения волн с вращающейся поляризацией?

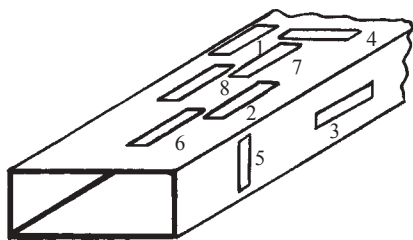


Рис. 4.9

4.34. Составить эквивалентную схему волновода со щелями для расчета проводимости $g_{щ}$ и сопротивлений $r_{щ}$ одиночных щелей. Написать и обосновать формулы для расчета величин $g_{щ}$ и $r_{щ}$.

4.35. Привести классификацию волноводно-щелевых антенн. Как располагаются щели на стенках волновода в прямо-фазных и переменнo-фазных антеннах?

4.36. Описать волноводно-щелевую антенну, работающую в режиме стоячих волн. Как осуществляется согласование волновода с возбуждающим его устройством? Чем объясняется узкополосность таких антенн?

4.37. Описать нерезонансные волноводно-щелевые антенны. Почему в этих антеннах устанавливают режим бегущих волн? Какие преимущества и недостатки имеют нерезонансные волноводно-щелевые антенны по сравнению с резонансными?

4.38. На рис. 4.10, *а*, *б*, *в* показано расположение щелей на стенках волноводно-щелевых антенн. Определить, где изображено следующее:

- 1) резонансная антенна;
- 2) резонансная синфазная и резонансная переменнo-фазная антенны;
- 3) антенна, работающая в режиме бегущих волн;
- 4) чему равны расстояния X_2, X_3, X_4, X_5 .

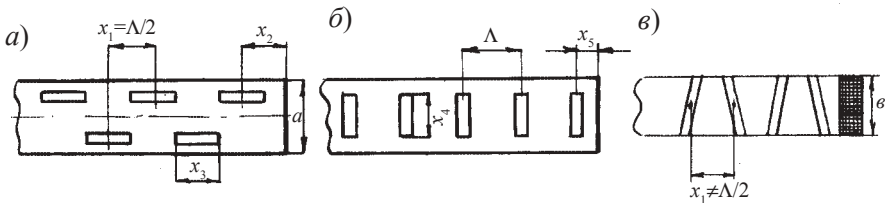


Рис. 4.10

4.39. Доказать, что угол отклонения максимума излучения несинфазной волноводно-щелевой антенны с шагом d выражается формулой

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\lambda}{\Lambda}.$$

Решение. Функция направленности волноводно-щелевой антенны по теореме перемножения определяется произведением функции направленности одной щели $f_1(\theta)$ на множитель решетки $f_n(\theta)$ – функцию направленности линейной системы из n воображаемых ненаправленных излучателей, который имеет вид:

$$f_n(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (kd \sin \theta - \psi) \right]}{n \sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta - \psi) \right]}, \quad (4.6)$$

где n – число щелей; d – расстояние между ними; $k = 2\pi/\lambda$ – постоянная распространения в свободном пространстве; ψ – сдвиг по фазе между токами в соседних излучателях; θ – угол отсчитывается от нормали к оси волноводно-щелевой антенны.

Направление максимального излучения получим, приравняв знаменатель выражения (4.6) нулю или аргумент синуса в знаменателе

$$\left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta_{\max} - \psi) \right] = m\pi,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Отсюда несложно получить для главного максимума при $m = 0$

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\psi}{kd}. \quad (4.7)$$

Токи возбуждают соседние щели с фазой $\psi = \beta d = 2\pi/\Lambda$, где Λ – длина волны в волноводе. Подставив это в формулу (4.7) получаем

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{2\pi d \lambda}{2\pi d \Lambda} = \arcsin \frac{\lambda}{\Lambda}.$$

4.40. Определить углы отклонения максимума излучения несинфазной волноводно-щелевой антенны от перпендикуляра к оси решетки θ_{\max} при изменениях частоты волны f от 6 до 5 ГГц в прямоугольном волноводе $R 70$ с внутренними размерами $a = 35$ мм, $b = 16$ мм.

Ответ. $\theta_{\max} = 44,5^\circ$ при $f = 6$ ГГц; $\theta_{\max} = 31^\circ$ при $f = 5$ ГГц.

4.41. Описать волноводно-щелевую антенну с увеличенной до 5–10% полосой пропускания.

4.42. Описать направленные свойства, достоинства и недостатки волноводно-щелевых антенн.

4.43. Рассчитать волноводно-щелевую антенну (см. рис. 4.10, *a*), которая имеет на волне $\lambda = 3,2$ см коэффициент усиления $G_0 = 12,6$ ($G_0 = 11$ дБ) и излучает мощность $P_\Sigma = 50$ кВт.

Решение. 1. Выбираем волновод $R100$ (МЭК-100) с внутренними размерами $a = 23$ мм, $b = 10$ мм.

Длина волны в волноводе

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{3,2}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,2}{4,6}\right)^2}} = \frac{3,2}{0,71} = 4,5 \text{ см.}$$

Волновое сопротивление волновода

$$Z_B = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = 531 \text{ Ом.}$$

Волновая проводимость волновода

$$g_B = \frac{1}{Z_B} = 0,188 \cdot 10^{-2}, \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Определяем число щелей в волноводе по формуле

$$n = \frac{G}{3,2} = \frac{12,6}{3,2} \approx 4.$$

Используем продольные полуволновые щели, прорезанные на широкой стенке волновода с интервалом в половину длины волны в волноводе $\frac{\Lambda}{2}$.

2. Проводимость одной щели для полного согласования антенны с волноводом должна быть

$$g'_{щ} = g_B \cdot \frac{1}{n} = \frac{0,188 \cdot 10^{-2}}{4} = 0,47 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Для согласования единичной щели с волноводом она смещается относительно осевой линии на величину x_1 , определяемую из уравнения

$$g_{щ} = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\Lambda}{\lambda} \sin^2 \left(\frac{\pi x_1}{a} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2\Lambda} \right).$$

Если щелей n , то $g_{щ} = \frac{1}{n}$. В данном случае $g_{щ} = \frac{1}{4} = 0,25$. Отсюда определяем x_1 :

$$\begin{aligned} \sin \left(\frac{\pi x_1}{a} \right) &= \sqrt{\frac{g_{щ}}{2,09 \frac{a}{b} \frac{\Lambda}{\lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2\Lambda} \right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10 \cdot 32}{2,09 \cdot 23 \cdot 45 \cos^2 \left(\frac{180 \cdot 32}{2 \cdot 45} \right)^\circ}} = 0,4386; \end{aligned}$$

$$x_1 = \frac{a}{180^\circ} (\arcsin 0,4386)^\circ = \frac{23 \cdot 26}{180} = 3,3 \text{ мм.}$$

Определяем ширину щели d . Она должна быть меньше $\Lambda/10 = 4,5$ мм, но достаточно большой, чтобы исключить возможность электрического пробоя. Полагая, что вся мощность P_Σ , излучаемая антенной, распределяется поровну между щелями, находим величину эффективного значения напряжения в пучности каждой щели

$$U_3 = \sqrt{\frac{P_\Sigma}{ng'_{щ}}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}}} = 5,2 \cdot 10^3 \text{ В} = 5,2 \text{ кВ.}$$

При трехкратном запасе прочности и пробивной напряженности электрического поля $E_{\text{проб}} = 30$ кВ/см получим

$$d = \frac{3U_3}{E_{\text{проб}}} = \frac{3 \cdot 5,2}{30} \approx 0,5 \text{ см} = 5 \text{ мм.}$$

За счет небольшого сокращения запаса прочности уменьшаем ширину щели до указанного выше предела 4,5 мм.

3. Радиус эквивалентного электрического вибратора равен четверти ширины щели

$$r_3 = \frac{d}{4} = \frac{4,5}{4} \approx 1,1 \text{ мм.}$$

4. Для определения волнового сопротивления эквивалентного вибратора обратимся к формуле

$$Z_{\text{в.э}} = 120 \left(\ln \frac{l}{2r_3} - 1 \right) = 120 \left(2,31 \lg \frac{\Lambda}{4r_3} - 1 \right),$$

откуда

$$Z_{\text{в.э}} = 120 \left(2,31 \lg \frac{45}{4 \cdot 1,1} - 1 \right) \approx 160 \text{ Ом.}$$

Геометрическая длина щели с учетом эффекта укорочения определяется по формуле

$$\frac{\Lambda}{2} - 2\Delta l = \frac{\Lambda}{2} - \frac{42,5\Lambda}{\pi Z_{\text{в.э}}} = \frac{45}{2} - \frac{42,5 \cdot 45}{3,14 \cdot 160} = 18,7 \text{ мм.}$$

5. Расчет ДН антенны в плоскости, проходящей через продольную ось волновода перпендикулярно его широким стенкам, производим по уравнению диаграммы антенны, состоящей из n синфазных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $\Lambda/2$,

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right) \sin \frac{n\Psi}{2}}{\cos \theta \sin \frac{\Psi}{2}},$$

где θ – угол между данным направлением и перпендикуляром к широкой стенке волновода; n – число щелей, $\Psi = \beta\left(\frac{\Lambda}{2} \sin \theta\right) =$

$= \left(\frac{360}{\lambda} \frac{\Lambda}{2} \sin \theta\right)^\circ = (252 \sin \theta)^\circ$ –сдвиг по фазе, обусловленный разностью хода волн от двух соседних щелей, которая равна $\frac{\Lambda}{2} \sin \theta$. Итак,

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right) \sin(504 \sin \theta)^\circ}{\cos \theta \sin(126 \sin \theta)^\circ}.$$

По диаграмме определяется ее ширина на уровне 0, 707 от максимального значения.

4.44. Определить КНД D_0 синфазной волноводно-щелевой антенны с шестью полуволновыми щелями.

Ответ. $D_0 \approx 19$.

Библиографический список

1. Власов В. И., Берман Я. И. Проектирование высокочастотных узлов радиолокационных станций. Л.: Судпромгиз, 1961.
2. Дорохов А. П. Расчет и конструирование антенно-фидерных устройств. Харьков: Изд-во Харьковск. ун-та, 1960.
3. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967.
4. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
5. Дробкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974.
6. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974.

5. АПЕРТУРНЫЕ АНТЕННЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

5.1. Рупорные антенны

5.1. Дать определение и классификацию апертурных антенн СВЧ, отметив их общие особенности.

5.2. Описать элемент Гюйгенса. Дать вывод уравнения нормированной ДН элемента Гюйгенса.

5.3. В соответствии с расположением электрического $(+Q, -Q)$ и магнитного $(+m, -m)$ диполей Герца, которые образуют элемент Гюйгенса (рис. 5.1, а), показаны их ДН в плоскостях ZX (рис. 5.1, б) и YZ (рис. 5.1, в). Указать ДН в E - и H -плоскостях электрического диполя, магнитного диполя и элемента Гюйгенса.

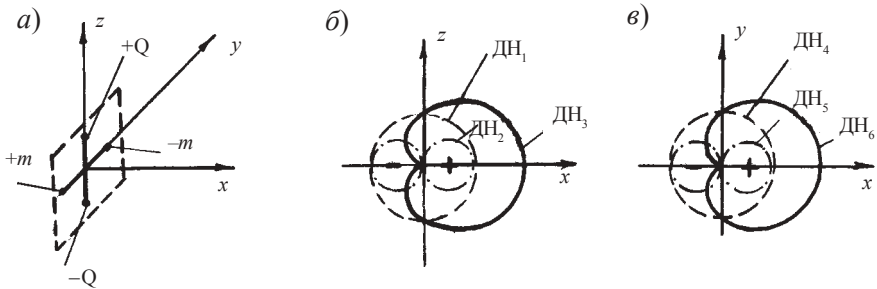


Рис. 5.1

5.4. Описать получение функций направленности прямоугольной площадки с равномерным и синфазным распределением полей.

5.5. Каковы свойства функции направленности синфазного прямоугольного раскрыва с постоянным распределением амплитуды поля?

5.6. Определить ширину в E - и H -плоскостях ДН синфазного и равномерного прямоугольного раскрыва сечением $a \times b = 23 \times 10$ мм при длине волны $\lambda = 3,2$ см.

Ответ. Ширина диаграммы $2\theta_{0,5P} = 71^\circ$ в плоскости с размером a и $2\theta_{0,5P} = 163,2^\circ$ в плоскости с размером b .

5.7. Описать направленные свойства прямоугольного волноводного излучателя. Как влияет на коэффициент использования площади излучателя неравномерность поля на его раскрыве?

5.8. Поля в раскрыве прямоугольного волноводного излучателя с волной H_{10} синфазные, а амплитуда их E_m распределяется равномерно по

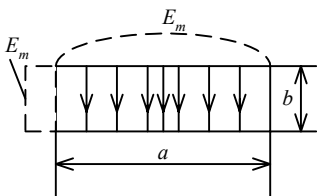


Рис. 5.2

стороне b и по закону косинуса по стороне a (рис. 5.2). Определить исходя из этого ширину ДН (град), уровни первого бокового лепестка УБЛ (дБ) и коэффициенты использования поверхности (КИП) раскрыва.

5.9. Обосновать целесообразность перехода от волноводного излучателя к рупору.

5.10. Начертить эскизы основных видов рупорных антенн. Описать различия структуры полей в рупоре и волноводе.

5.11. Вывести формулы отклонения фазового фронта в раскрыве рупора от плоского. Обосновать существование рупоров оптимальных размеров и написать формулы для расчета коэффициентов усиления таких антенн.

5.12. Перечислить и обосновать достоинства и недостатки рупорных антенн. Каковы области применения этих антенн?

5.13. Определить коэффициент усиления G и ширину ДН в E - и H -плоскостях $2\theta_{E0,5P}$, $2\theta_{H0,5P}$ H -плоскостного секториального рупора оптимальных размеров, который при раскрыве $a' = 60$ см, $b' = 6,4$ см (рис. 5.3, а) принимает волны длиной $\lambda = 20$ см.

В данном случае

$$G_0 = 7,9 \frac{a'b'}{\lambda^2}; \quad 2\theta_{E0,5P} = 51^\circ \frac{\lambda}{b'}; \quad 2\theta_{H0,5P} = 80^\circ \frac{\lambda}{a'}.$$

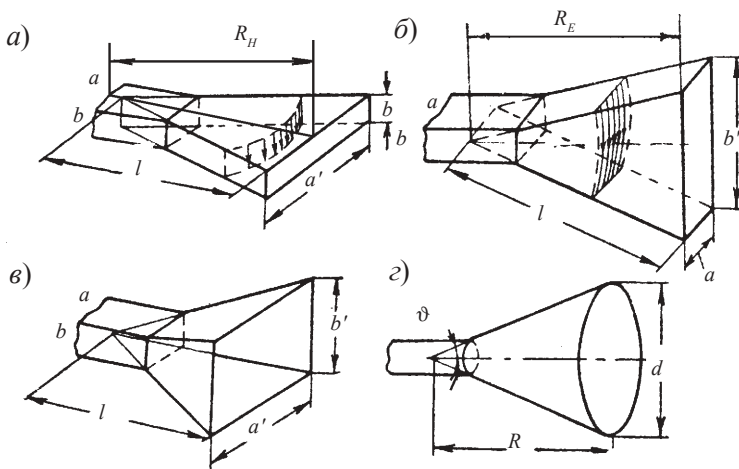


Рис. 5.3

Ответ. $G_0 = 7,6$; $2\theta_{E0,5P} = 160^\circ$; $2\theta_{H0,5P} = 26,7^\circ$.

5.14. Определить оптимальные значения размера b' раскрыва и длины l E -плоскостного секториального рупора (рис. 5.3, б), который при длине волны $\lambda = 5$ см и размере $a' = 3,55$ см имеет коэффициент усиления $G_0 = 25$.

В данном случае

$$G_0 = 8 \frac{a'b'}{\lambda^2}; 2\theta_{E0,5P} = 53^\circ \frac{\lambda}{b'}; 2\theta_{H0,5P} = 68^\circ \frac{\lambda}{a'}; l = \frac{(b')^2}{2,1\lambda}.$$

Ответ. $b' = 22$ см; $l = 46$ см.

5.15. Определить ширину ДН антенны в плоскостях E и H по данным задачи 5.14.

Ответ. $2\theta_{E0,5P} = 12^\circ$; $2\theta_{H0,5P} = 95,8^\circ$.

5.16. Рассчитать пирамидальный рупор (рис. 5.3, в), который при возбуждении прямоугольным волноводом R 100 (МЭК-100) с размерами $a \times b = 23 \times 10$ мм имеет на волне $\lambda = 3$ см коэффициент усиления $G_0 \geq 40$ ($G_0 \geq 16$ дБ).

Решение. 1. Размеры рупора в горловине определяются внутренними размерами волновода: $a = 23$ мм, $b = 10$ мм.

Определяем площадь раскрыва рупора S_A из формулы

$$G_0 = 6 \frac{a'b'}{\lambda^2} = 6 \frac{S_A}{\lambda^2}; S_A = \frac{G\lambda^2}{6} = \frac{40 \cdot 9}{6} = 60 \text{ см}^2.$$

Определяем размеры сторон раскрыва рупора a' и b' исходя из оптимального соотношения между ними:

$$b' = 0,8a' = \frac{0,8S_A}{b'} = \frac{48}{b'},$$

откуда

$$b' = \sqrt{48} \approx 6,9 \text{ см}; a' = \frac{6,93}{0,8} = 8,7 \text{ см}.$$

3. Определяем радиальную длину рупора (расстояние от фазового центра до ближайшей точки раскрыва) в H -плоскости

$$R_H = \frac{(a')^2}{3\lambda} = \frac{8,7^2}{3 \cdot 3} = 8,45 \text{ см}.$$

4. Определяем боковую длину рупора из соотношения

$$l = \sqrt{R_H^2 + \left(\frac{a'}{2}\right)^2} = \sqrt{8,45^2 + \left(\frac{8,7}{2}\right)^2} = 9,55 \text{ см.}$$

5. Определяем расстояние от фазового центра до ближайшей точки раскрыва в плоскости

$$R_E = \sqrt{l^2 - \left(\frac{b'}{2}\right)^2} = \sqrt{9,55^2 - \left(\frac{6,9}{2}\right)^2} = 8,9 \text{ см.}$$

6. Определяем максимальный сдвиг по фазе на краях раскрыва рупора

$$\Psi_{\max} = \frac{\pi}{4\lambda} \left(\frac{b'^2}{R_E} + \frac{a'^2}{R_H} \right) = \frac{\pi}{4 \cdot 3} \left(\frac{6,9^2}{8,9} + \frac{8,7^2}{8,45} \right) = 0,445\pi + 0,745\pi.$$

Первое слагаемое соответствует фазовым искажениям в плоскости E , а второе – в плоскости H . Такие искажения находятся примерно на верхнем пределе допустимых искажений.

7. Рассчитываем ДН, полагая, что поле в раскрыве рупора синфазно. В плоскости E уравнение диаграммы

$$f(\theta)_E = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \frac{\sin \left(\frac{\pi b'}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi b'}{\lambda} \sin \theta \right)} = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \frac{\sin(414 \sin \theta)^\circ}{7,22 \sin \theta},$$

а в плоскости H

$$f(\theta)_H = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \frac{\cos \left(\frac{\pi a'}{\lambda} \sin \theta \right)}{1 - \left(\frac{2a'}{\lambda} \sin \theta \right)^2} = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \frac{\cos(522 \sin \theta)^\circ}{1 - 24,06 \sin^2 \theta},$$

где θ – углы между данным направлением и нормалью к раскрыву рупора соответственно в E - и H -плоскостях.

8. Ширину ДН можно определить по построенным диаграммам или по формулам

$$2\theta_{E_{0,5P}} = 53^\circ \frac{\lambda}{b'} = 53^\circ \frac{3}{6,9} = 23^\circ; \quad 2\theta_{H_{0,5P}} = 80^\circ \frac{\lambda}{a'} = 80^\circ \frac{3}{8,7} = 27,5^\circ.$$

5.17. Пирамидальный рупор оптимальных размеров (рис. 5.3, в) рассчитан на работу при длине волны $\lambda = 9$ см и имеет длину рупора $l = 36$ см. Определить размеры раскрыва a' , b' и коэффициент усиления антенны.

Ответ. $b' = 26,3$ см; $a' = 32,9$ см; $G_0 = 64,1$.

5.18. Определить ширину ДН антенны в плоскостях E и H по данным задачи 5.17.

Ответ. $2\theta_{E_{0,5P}} = 18,1^\circ$; $2\theta_{H_{0,5P}} = 22,2^\circ$.

5.19. Определить угол расширения ϑ и диаметр d конического рупора оптимальных размеров (рис. 5.3, з), который имеет длину $l = 40$ см при длине волны $\lambda = 8$ см

Для конического рупора оптимальных размеров

$$l = \frac{0,3 \cos \vartheta}{1 - \cos \vartheta} \lambda; \quad d = \frac{0,6 \sin \vartheta \cos \vartheta}{1 - \cos \vartheta} \lambda; \quad 2\theta_{E_{0,5P}} = 60^\circ \frac{\lambda}{d}; \quad 2\theta_{H_{0,5P}} \approx 70^\circ \frac{\lambda}{d};$$

$$G_0 \approx 5,1 \frac{d}{\lambda}.$$

Ответ. $\vartheta = 19^\circ 24'$; $d = 26,4$ см.

5.20. Определить КУ и ширину ДН в плоскостях E и H конического рупора по данным задачи 5.19.

Ответ. $G_0 = 55,6$; $2\theta_{E_{0,5P}} = 18,2^\circ$; $2\theta_{H_{0,5P}} \approx 21,2^\circ$.

5.21. Описать рупорную антенну с ортогональной поляризацией. Почему придают квадратную форму раскрыву рупора? Каким способом уравнивают ширину ДН для вертикально и горизонтально поляризованных волн?

5.2. Зеркальные антенны

5.22. Сформулировать основные определения, связанные с рефлекторными (зеркальными) антеннами.

5.23. Описать принцип действия параболической антенны исходя из законов геометрической (лучевой) оптики.

5.24. Описать направленные свойства параболоида вращения. Как зависит направленность излучения параболической антенны от относительных размеров параболоида и амплитудно-фазового распределения поля на его раскрыве?

5.25. Описать структуру электрического поля в раскрыве длиннофокусного и короткофокусного параболоидов вращения. Какая из составляющих этого поля является основной (полезной) и какая – перекрестной (вредной)? Какие значения угла раскрыва параболоида являются оптимальными и какой при этом получается коэффициент использования поверхности раскрыва антенны?

5.26. Написать и обосновать формулы КУ, УБЛ и ширины ДН в E - и H -плоскостях параболоида вращения при оптимальных углах его раскрыва.

5.27. Описать направленные свойства параболического цилиндра. Чем определяется веерообразная форма его ДН? Укажите достоинства и недостатки антенн с рефлектором в виде параболического цилиндра.

5.28. Определить коэффициент направленного действия D_0 антенны с рефлектором в виде параболоида вращения диаметром $d = 60$ см при длине волны $\lambda = 2$ см и коэффициенте использования поверхности антенны $\nu = 0,55$.

Ответ. $D_0 = 4950$.

5.29. Какой угол, из трех значений половины угла раскрыва параболической антенны $\vartheta = 65, 90, 130^\circ$, является наиболее приемлемым, если в качестве облучателя используется диполь?

Ответ. $\vartheta = 65^\circ$.

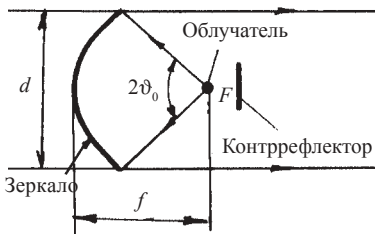


Рис. 5.4

5.30. Определить ширину ДН $2\theta_{E_{0,5P}}, 2\theta_{H_{0,5P}}$ антенны с рефлектором в виде параболоида вращения диаметром $d = 50$ см, облучаемого полуволновым вибратором с плоским контррефлектором (рис. 5.4), если длина волны, на которой работает антенна $\lambda = 2,5$ см.

Ответ. $2\theta_{E_{0,5P}} = 3^\circ 45'$;
 $2\theta_{H_{0,5P}} = 3^\circ 30'$.

5.31. Параболоид вращения с углом раскрыва $2\vartheta_0$ облучается с ослаблением поля на краях зеркала L (дБ). Это соответствует определенным значениям КИП, КПД и КНД. Почему с уменьшением угла $2\vartheta_0$ увеличивается КИП и уменьшается КПД антенны? Почему при $L = 10$ дБ получается максимум КНД?

5.32. Антенна с зеркалом в виде параболического цилиндра и линейного облучателя имеет раскрыв $d_1 = 4$ м, $d_2 = 0,4$ м и излучает волны длиной $\lambda = 8$ см. Определить ширину ДН $2\theta_{E_{0,5P}}, 2\theta_{H_{0,5P}}$.

Ответ. $2\theta_{E_{0,5P}} \approx 1,2^\circ$; $2\theta_{H_{0,5P}} \approx 12^\circ$.

Из полученного результата видно, что форма ДН плоская (веерная).

5.33. Описать, как влияет на ДН параболической антенны смещение облучателя по фокальной линии зеркала и поперек этой линии. В каких пределах допустимо смещение облучателя из фокуса зеркала?

5.34. Параболоид вращения диаметром $d = 1,3$ м облучается полуволновым вибратором с плоским контррефлектором. Предусмотрено оптимальное отношение d к фокусному расстоянию f . Определить смещение ΔX облучателя из фокуса зеркала, требуемое для отклонения луча антенны на угол $\delta = 12^\circ$ от фокальной линии.

Поиск решения. Зная, что оптимальное отношение $d/f = 2,6$, начинаем с вычисления фокусного расстояния f . Затем, по формуле находим ΔX .

Решение. 1. Фокусное расстояние антенны

$$f = d/2,6 = 1,3/2,6 = 0,5 \text{ м.}$$

2. Смещение облучателя из фокуса рассчитывается по формуле

$$\Delta X = \frac{\sin \vartheta (8f^2 + 0,25d^2)}{8f} = \frac{\sin 12^\circ (8 \cdot 0,5^2 + 0,25 \cdot 1,3^2)}{8 \cdot 0,5} = 0,12 \text{ м} = 12 \text{ см.}$$

5.35. Определить угол раствора δ конической ДН, который получается при вращении облучателя, смещенного на $\Delta X = 10$ см из фокуса парабооида вращения диаметром $d = 2$ м. Фокусное расстояние антенны f соответствует оптимальному отношению d/f , установленному для случая: облучатель – полуволновой вибратор и плоский контррефлектор.

5.36. Определить фокусное расстояние f парабооида вращения, имеющего угол раскрыва $2\vartheta_0 = 120^\circ$ и КНД $D_0 = 400$ при длине волны $\lambda = 3$ см и КИП антенны $\nu = 0,6$.

Поиск решения. Зная, что КНД, КИП, рабочая длина волны и геометрическая площадь раскрыва S_A связаны зависимостью

$$D_0 = \frac{4\pi\nu S_A}{\lambda^2},$$

определяем S_A , а затем из формулы $S_A = \frac{\pi d^2}{4}$ вычисляем диаметр зеркала d .

Теперь обращаемся к формуле

$$f = \frac{d}{4} \operatorname{ctg} \frac{\vartheta_0}{2},$$

чтобы вычислить фокусное расстояние f .

Решение. 1. Геометрическая площадь раскрыва зеркала

$$S_A = \frac{D_0 \lambda^2}{4\pi v} = \frac{400 \cdot 3^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,6} = 477,7 \text{ см}^2.$$

2. Диаметр параболоида

$$d = \sqrt{\frac{4S_A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 477,7}{3,14}} = 24,7 \text{ см.}$$

3. Фокусное расстояние антенны

$$f = \frac{24,7}{4} \operatorname{ctg} 30^\circ = 10,7 \text{ см.}$$

5.37. Определить угол раскрыва $2\vartheta_0$ параболоида вращения, имеющего фокусное расстояние 20 см, КНД 1000 при длине волны 4 см и КИП антенны 0,5.

Ответ. $2\vartheta_0 = 71^\circ$.

5.38. Перечислить и обосновать требования, предъявляемые к облучателям рефлекторных антенн.

5.39. На рис. 5.5, *а*, *б* показаны облучатели, содержащие полуволновой вибратор и плоский круглый диск в качестве контррефлектора. Облучатель питается от коаксиального волновода. Указать число, обозначающее короткозамкнутые пробки, симметрирующий четвертьволновый стакан, коаксиальные волноводы, дисковые контррефлекторы, активные вибраторы, место соединения внутреннего и внешнего провода волновода с вибратором, симметрирующую щель.

5.40. Описать облучатель – полуволновой вибратор, симметрично возбуждаемый с помощью двух полуволновых щелей, прорезанных во внешнем проводе коаксиального волновода, с контррефлектором (рис. 5.5, *б*).

5.41. Описать облучатель с полуволновым вибратором, возбуждаемым прямоугольным волноводом и другим вибратором, который служит контррефлектором.

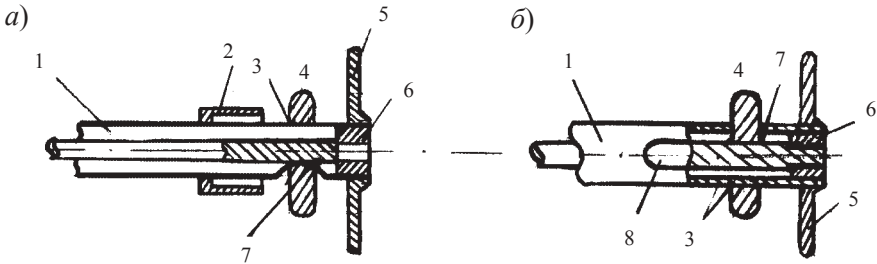


Рис. 5.5

5.42. Описать щелевой облучатель, отличающийся пониженным теневым эффектом. Какие факторы снижают допустимую мощность в антенне при таком облучателе?

5.43. Определить основные геометрические размеры и направленные свойства антенны – параболоида вращения с полуволновым вибратором и дисковым контррефлектором (см. рис. 5.4), причем известно, что размеры антенны оптимальные и при длине волны $\lambda = 12$ см КНД $D_0 = 350$.

Решение. 1. Известно, что оптимальный угол раскрыва зеркала $2\vartheta_0 = 120-140^\circ$. Выбираем $\vartheta_0 = 64^\circ$ и при этом считаем, что КИП $\nu \approx 0,55$.

2. Геометрическая поверхность раскрыва параболоида

$$S_A = \frac{D_0}{4\pi\nu} \lambda^2 = \frac{350}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,55} \cdot 12^2 = 7295 \text{ см}^2.$$

3. Диаметр параболоида, поскольку $S_A = \frac{\pi d^2}{4}$

$$d = \sqrt{\frac{4S_A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7295}{314}} = 96,4 \text{ см.}$$

4. Фокусное расстояние в соответствии с геометрией параболы

$$f = \frac{d}{4} \operatorname{ctg} \frac{\vartheta_0}{2} = \frac{96,4}{4} \operatorname{ctg} 32^\circ = 38,6 \text{ см.}$$

5. Расстояние между вибратором и контррефлектором

$$l_{\text{вк}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{12}{4} = 3 \text{ см.}$$

6. Диаметр контррефлектора

$$d_{кр} = 0,8\lambda = 0,8 \cdot 12 = 9,6 \text{ см.}$$

7. Рассчитываем ДН облучателя в E - и H -плоскостях как системы антенна–рефлектор (расчет такого облучателя приведен в задаче 4.5).

8. Распределение амплитуды поля на раскрыве параболоида связано с диаграммой облучателя и углом раскрыва зеркала соотношением

$$\frac{E}{E_{\max}} = \cos^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) f_{\text{обл}}(\vartheta).$$

Для угла раскрыва $\vartheta = \vartheta_0$ получим значение амплитуды поля на краю зеркала

$$\Delta = \cos^2 \left(\frac{\vartheta_0}{2} \right) f_{\text{обл}}(\vartheta_0).$$

При заданных значениях угла раскрыва зеркала значение функции направленности облучателя в E -плоскости $f_{\text{обл}E}(64^\circ) \approx 0,305$, а в плоскости H – $f_{\text{обл}H}(64^\circ) \approx 0,9$ (см. табл. 4.3). Уровень поля на краю зеркала равен для плоскости E и H соответственно $\Delta_E = 0,22$ и $\Delta_H = 0,67$. Из сводки функций излучения для круглой апертуры можно определить коэффициенты, связывающие ширину диаграммы зеркала с его раскрывом при данном уровне поля на краю. Предполагая, что поле в раскрыве может быть аппроксимировано параболической функцией второй степени, получим

$$2\theta_{0,5P_E} \approx 70^\circ \frac{\lambda}{d}, \quad 2\theta_{0,5P_H} \approx 61^\circ \frac{\lambda}{d}.$$

Поскольку диаграмма облучателя в H -плоскости шире, чем в E -плоскости, то диаграмма зеркала уже в H -плоскости и уровень первого бокового лепестка больше.

Распределение поля по всему раскрыву можно рассчитать, задаваясь значениями углов $\vartheta = 0 - \vartheta_0$. Каждое значение угла связано с координатой на раскрыве зеркала. Построив зависимость E/E_{\max} от нормированной координаты раскрыва X/X_0 , где $X_0 = d/2$, находят аппроксимирующую данное распределение параболическую функцию

$$\frac{E}{E_{\max}} = \Delta + (1 - \Delta) \left[1 - \left(\frac{X}{X_0} \right)^2 \right]^p$$

при показателях степени $p = 1, 2, 3, \dots$ и $X/X_0 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$. Далее рассчитываю ДН зеркала как круглой апертуры

$$f_A(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \left\{ \Delta \Lambda_1(u) + \frac{1 - \Delta}{p+1} \Lambda_{p+1}(u) \right\} \frac{1}{\Delta + \frac{1 - \Delta}{p+1}},$$

здесь $\Lambda_{p+1}(u)$ – лямбда-функция от аргумента $u = \frac{kd}{2} \sin \theta$.

5.44. Описать схему и принцип действия антенны Кассегрена. Какую роль выполняют в ней вспомогательное и основное зеркала? Какой профиль придают этим зеркалам?

5.45. Сравнить антенну Кассегрена с однозеркальной параболической антенной, отметить их преимущества и недостатки.

5.46. Описать схему и принцип действия двухзеркальной антенны со смещенной фокальной осью (АДЭ – антенна двухзеркальная с малым эллиптическим зеркалом). Чем различаются АДЭ и антенна Кассегрена, и какие преимущества имеет первая перед второй?

5.47. На рис. 5.6 показана двухзеркальная антенна со смещенной фокальной осью. Указать цифры, обозначающие параболическое зеркало; рупорный облучатель; дополнительное зеркало; фокусы параболы; фазовый центр облучателя. Перечислить технические характеристики антенны АДЭ-5.

5.48. Описать устройство и принцип действия рупорно-параболической антенны (РПА). Какие преимущества дает конструктивное объединение рупорного облучателя с параболическим зеркалом? Какие эксплуатационные недостатки имеют РПА?

5.49. Описать рупорную антенну с ортогональной поляризацией. Почему придают квадратную форму раскрытию рупора? Каким способом уравнивают ширину ДН для вертикально (H_{10}) и горизонтально (H_{01}) поляризованных волн?

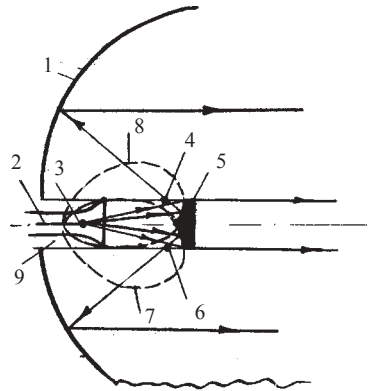


Рис. 5.6

5.50. Описать направленные свойства параболоцилиндрической антенны. Чем вызваны высокий КИП и возможность избежать паразитной поляризации параболоцилиндрической антенны?

5.51. Описать волноводно-вибраторный и сегментно-параболический линейные облучатели. Какую форму имеет ДН и какой формулой выражается КНД сегментно-параболической антенны?

5.52. Описать антенны с зеркалом в виде усеченного параболоида. Какую форму имеет зеркало при симметричном и несимметричном усечении зеркала. Каким образом при несимметричном усечении исключается затенение зеркала облучателем?

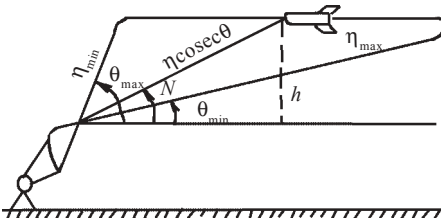


Рис. 5.7

5.53. Описать форму и уравнение ДН типа, $f(\theta) = \text{cosec}\theta$. В каких случаях требуются антенны с такой ДН (рис. 5.7)?

5.54. Описать получение косекансной ДН самолетной РЛС, антенна которой содержит зеркало специального профиля и сегментно-параболический облучатель.

5.55. Описать антенны с косекансной ДН для наземной РЛС обзора воздушного пространства. Отметить особенности конструкции, преимущества и недостатки.

5.56. Описать электромеханическое сканирование при сферопараболической антенне. Из каких соображений выбирается взаимное расположение зеркала, центра его вращения и облучателя? Каковы достоинства такого метода сканирования?

5.57. Описать электромеханическое сканирование при облучающем устройстве органного типа. Что в этом устройстве существенно упрощает механизм сканирования?

5.3. Линзовые антенны

5.58. Описать назначение и классификацию линзовых антенн. Чем принципиально отличаются преобразования волн, происходящие в линзовых и зеркальных антеннах?

5.59. Описать принцип действия диэлектрических линз. Почему они должны быть замедляющими?

5.60. Вывести уравнения профиля диэлектрической линзы. Показать что в замедляющей линзе профиль освещенной поверхности должен

быть гиперболическим, а теневая поверхность должна быть плоской и синфазной.

5.61. Исследовать формулу толщины диэлектрической линзы. Из каких соображений выбирают материал и размеры линзы? Отметить достоинства и недостатки таких линз.

5.62. Описать металлопластинчатые линзы. Почему они называются ускоряющими и должны быть плосковогнутыми?

5.63. Отметить, в каких случаях тело линзы должно иметь форму эллипсоида вращения, эллиптического цилиндра, гиперboloида вращения и гиперболического цилиндра.

5.64. Описать, с какой целью и каким образом производят зонирование замедляющих и ускоряющих линз. Какие преимущества и недостатки имеют зонированные линзы по сравнению с незонированными?

5.65. Определить толщину m незонированной (рис. 5.8, а) и зонированной (рис. 5.8, б) диэлектрических линз, изготовленных из полистирола (показатель преломления $n = 1,6$) и рассчитанных на излучение волн с $\lambda = 6$ см. Размеры линзы: диаметр $d = 120$ см, фокусное расстояние $f = 120$ см, для зонированной линзы $m = 1,5$ см.

Решение. 1. Толщину незонированной линзы определяем по формуле

$$m = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{d^2}{4(n^2-1)}} =$$

$$= -\frac{120}{1,6+1} + \sqrt{\left(\frac{120}{1,6+1}\right)^2 + \frac{120^2}{4(2,56-1)}} = 20,9 \text{ см.}$$

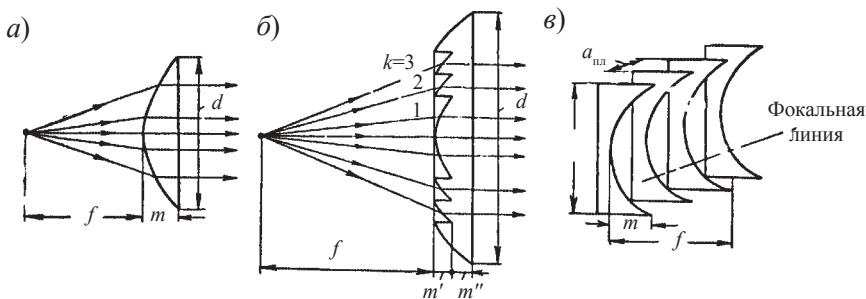


Рис. 5.8

2. Ширина ступеньки зонированной линзы

$$m' = \frac{\lambda}{n-1} = \frac{6}{1,6-1} = 10 \text{ см.}$$

3. Толщина всей зонированной линзы

$$m = m' + m'' = 10 + 1,5 = 11,5 \text{ см.}$$

Как видно, зонирование линзы позволило уменьшить ее толщину в 1,8 раза ($20,9/11,5 = 1,8$).

5.66. Определить, во сколько раз уменьшится толщина диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n = 1,6$) и имеющий диаметр $d = 150$ мм, фокусное расстояние $f = 160$ см, если применить в ней зонирование при длине волны $\lambda = 8$ см, и размере $m'' = 1,5$ см (рис. 5.8, б).

Ответ. В 1,6 раза.

5.67. Определить толщину ускоряющей металлопластинчатой линзы при расстоянии между пластинами $a_{\text{пл}} = 5,5$ см, длине волны $\lambda = 10$ см, фокусном расстоянии $f = 180$ см и размере $d = 180$ см (рис. 5.8, в).

Решение. 1. Показатель преломления линзы

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

2. Поскольку данная линза ускоряющая ($n < 1$), то формула толщины линзы

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

5.68. Какое расстояние $a_{\text{пл}}$ должно быть между металлическими пластинами незонированной ускоряющей линзы (рис. 5.8, в), чтобы показатель преломления ее был равен 0,5 при длине волны $\lambda = 4$ см.

Ответ. $a_{\text{пл}} = 2,31$ см.

5.69. Какой станет толщина m линзы (данные линзы приведены в задаче (5.67)) если эту линзу зонировать?

Глубина ступеньки зонированной ускоряющей линзы $m' = \frac{\lambda}{(1-n)}$.
 Принимаем $m' = 1$ см и так же, как для замедляющей линзы $m = m' + m''$.

Ответ: $m = 17,2$ см.

5.70. Определить полосу пропускания $\Delta f_{\text{пр}}$ зонированной диэлектрической линзы, если линза имеет 10 зон ($k = 10$) и рассчитана на несущую частоту радиосигнала $f_0 = 3$ ГГц.

Относительная полоса пропускания замедляющей линзы выражается формулой

$$\frac{\Delta f_{\text{пр}}}{f_0} = 0,5/k.$$

Ответ. 150 МГц.

5.71. Объяснить, с какой целью вводят в рупоры линзовые вставки. Как они влияют на ДН и КУ антенны? Привести примеры рупорно-линзовых антенн.

5.72. Рассчитать H -плоскостной рупор с корректирующей металлопластинчатой линзой (рис. 5.9). Коэффициент усиления антенны $G_0 = 15$ при длине волны $\lambda = 8$ см.

Решение. 1. Определяем размеры поперечного сечения рупора в месте соединения его с волноводом.

$$a = 0,71\lambda = 0,71 \cdot 8 = 5,8 \text{ см};$$

$$b = 0,32\lambda = 0,32 \cdot 8 = 2,6 \text{ см}.$$

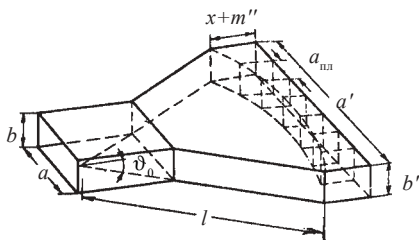


Рис. 5.9

2. Определяем геометрическую площадь раскрыва рупора S_A . Так как КПД рупорной антенны η_A близок к 100%, то КНД

$$D_0 = \frac{G_0}{\eta_A} \approx G_0 = 15.$$

Благодаря корректирующей линзе поле в раскрыве рупора синфазное. Это позволяет считать, что коэффициент использования поверхности антенны в плоскости E (где амплитуда распределяется равномерно) равен $v_E = 1$, а в плоскости H (где амплитуда изменяется по синусоидальному закону) $v_H = 0,81$. Отсюда находим КНД в плоскостях E и H :

$$D_H = \frac{4\pi}{\lambda^2} v_H S_A = \frac{4\pi}{8^2} 0,81 S_A = 0,16 S_A;$$

$$D_E = \frac{4\pi}{\lambda^2} v_E S_A = \frac{4\pi}{8^2} 1 S_A = 0,2 S_A.$$

3. Определяем размеры рупора a' , b' в его раскрыве. Поскольку рупор секториальный, то $b' = b = 2,6$ см, а $a' = \frac{S_A}{b'} = \frac{83}{2,6} = 31,9$ см.

4. Выбираем оптимальное значение показателя преломления линзы $n = 0,5$.

5. Выбираем угол раскрыва рупора ϑ . Так как с уменьшением ϑ линза облучается равномернее, а длина рупора при этом возрастает, то выбираем промежуточное значение $\vartheta = 25^\circ$.

6. Определяем длину рупора l . Из рис. 5.9 видно, что $\sin \vartheta = \frac{a'}{2l}$. Отсюда находим

$$l = \frac{a'}{2 \sin \vartheta} = \frac{31,9}{2 \cdot 0,4226} = 37,7 \text{ см.}$$

7. Определяем толщину линзы m' , полагая, что фокусное расстояние $f = l = 37,7$ см.

$$\begin{aligned} m' &= \frac{f}{n+1} - \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 - \frac{a'^2}{4(1-n^2)}} = \\ &= \frac{37,7}{0,5+1} - \sqrt{\left(\frac{37,7}{0,5+1}\right)^2 - \frac{37,7^2}{4(1-0,5^2)}} = 8 \text{ см.} \end{aligned}$$

8. Определяем расстояние между пластинами линзы $a_{\text{пл}}$. Показатель преломления волноводной линзы

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_{\text{пл}}}\right)^2}$$

отсюда

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

9. Определяем количество интервалов между пластинами в линзе

$$k_{\text{пл}} = \frac{a'}{a_{\text{пл}}} = \frac{31,9}{4,7} = 6,8.$$

Округляем значение $k_{\text{пл}}$ до семи и соответственно увеличиваем размер раскрыва $a' = 7a_{\text{пл}} = 7 \cdot 4,7 = 32,9$ см, а длину рупора рассчитываем

$$l = \frac{a'}{2 \sin \vartheta} = \frac{32,9}{2 \cdot 0,4226} = 38,9 \text{ см.}$$

Фокусное расстояние сохраняем без изменения.

10. Определяем длину x каждой пластины линзы. При этом исходим из уравнения профиля ускоряющей линзы

$$(1 - n^2)x^2 - (1 - n)2fx + y^2 = 0,$$

в данном случае уравнение имеет вид

$$(1 - 0,5^2)x^2 - (1 - 0,5) \cdot 2 \cdot 37,7x + y^2 = 0,$$

Решив это уравнение относительно x , получим

$$x = \frac{37,7 - \sqrt{37,7^2 - 3y^2}}{1,5} = 25,1 - \sqrt{6,3 \cdot 10^2 - 1,3y^2}.$$

Подставляем в полученное выражение значения

$$y = \pm \frac{a'}{2}; y = \pm \left(\frac{a'}{2} - a_{\text{пл}} \right); y = \pm \left(\frac{a'}{2} - 2a_{\text{пл}} \right) \text{ и т. д.,}$$

и результаты расчета сводим в табл. 5.1.

К полученным значениям x следует прибавить постоянную величину m'' (принимаем $m'' = 2$ см).

Максимальное значение x – порядка длины волны λ . Если бы толщина линзы оказалась более значительной, то следовало применить зонирование линзы.

Таблица 5.1

y , см	$\pm 16,45$	$\pm 11,75$	$\pm 7,05$	$\pm 2,35$
x , см	8,4	4,0	1,3	0,15

11. Определяем ширину ДН антенны. Так как линза обеспечила синфазность поля в раскрыве антенны и не нарушила существенно распределение амплитуды этого поля, то можно считать, что ширина ДН в H -плоскости

$$2\theta_{0,5PH} \approx \left(1,2 \frac{\lambda}{a'}\right)_{\text{рад}} = \left(57,3^\circ \cdot 1,2 \frac{\lambda}{a'}\right)^\circ = \left(57,3^\circ \cdot 1,2 \cdot \frac{8}{31,9}\right)^\circ = 17,3^\circ,$$

а в E -плоскости

$$2\theta_{0,5PE} \approx \left(0,88 \frac{\lambda}{b'}\right)_{\text{рад}} = \left(57,3^\circ \cdot 0,88 \frac{\lambda}{b'}\right)^\circ = \left(57,3^\circ \cdot 0,88 \cdot \frac{8}{2,6}\right)^\circ = 157^\circ.$$

5.73. Описать линзы, изготовленные из искусственного диэлектрика. Привести примеры практического выполнения такого вида линз.

5.74. Линза из искусственного диэлектрика образована металлическими дисками радиуса $R = 0,5$ см, впрессованными в пенистый полистирол, и имеет показатель преломления $n = 1,55$. Сколько дисков N должно быть в каждом см^3 объема линзы?

Относительная диэлектрическая проницаемость таких линз

$$\varepsilon = 1 + 16N \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right] \frac{R^3 [\text{см}^3]}{3}.$$

Ответ. $N = 4,2$.

5.75. Линза из искусственного диэлектрика образована металлическими лентами каждая шириной $0,6$ см, впрессованными в пенистый полистирол. Сколько таких лент N должно приходиться на 1 см^3 площади продольного сечения линзы, чтобы показатель преломления линзы был равен $1,6$?

Относительная диэлектрическая проницаемость таких линз

$$\varepsilon = 1 + \pi a^2 [\text{см}^2] \frac{N \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right]}{4}.$$

Ответ. $N = 3,3 \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right]$.

5.76. Обобщить данные о линзовых антеннах, сравнить их по диапазоным свойствам и другим техническим показателям.

5.77. Описать линзу Лüneберга, принцип работы и возможность использования ее для электромеханического сканирования. Каковы достоинства и недостатки линзы Лüneберга?

5.4. Антенны в радиолокационных станциях

5.78. Описать особенности антенн радиорелейных линий (РРЛ), обусловленные их целевым назначением. Отметить значения ширины ДН, коэффициента усиления, развязки между каналами приема волн с прямого и обратного направлений, относительной полосы пропускания, поляризации и других, специфических для антенн РРЛ показателей.

5.79. Перечислить функции, выполняемые антеннами радиолокационных станций (РЛС), и предъявляемые к ним требования.

5.80. Нарисовать иглообразную ДН, плоскую (веерную) и многолучевую ДН и указать целевое назначение таких диаграмм.

5.81. Какими и почему должны быть КПД, шумовая температура, уровни боковых и задних лепестков ДН, электрическая прочность, габариты, масса и другие параметры антенн РЛС?

5.82. На примере самолетной антенны РЛС обзора земной поверхности описать механическое сканирование.

5.83. Описать коническое сканирование и как оно используется для автоматического сопровождения радиолокационных целей по направлению. Можно ли получить широкоугольное сканирование на основе применения конической ДН?

5.84. Описать ДН антенны моноимпульсной РЛС. Какую форму имеют ДН на выходах устройства суммирования и вычитания сигналов лучей антенны?

5.85. Описать структурную схему устройства автоматического сопровождения по одной угловой координате (АСН), применяемого в моноимпульсной РЛС. Каким образом получают опорный сигнал и сигнал рассогласования по направлению (рис. 5.10)?

5.86. Описать четырехрупорный облучатель антенны моноимпульсной РЛС, структуру полей в рупорах, необходимую для формирования требуемых ДН (рис. 5.11). Отметить недостатки конструкции облучателя.

5.87. Описать многомодовый облучатель антенны моноимпульсной РЛС. Как сопрягаются рупор, квадратный волновод и суммарно-разностный мост и какие функции они выполняют? В чем принципиальные

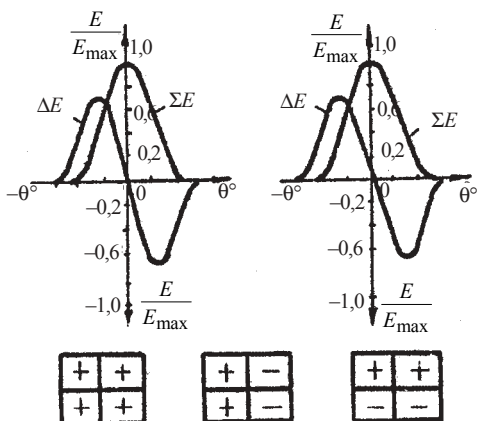


Рис. 5.10

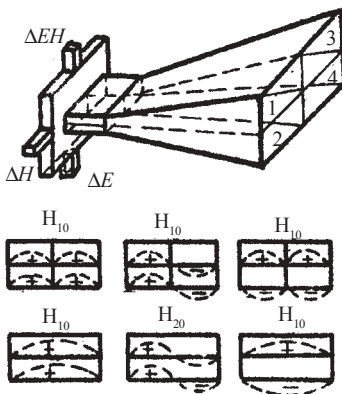


Рис. 5.11

преимущества многомодового облучателя по сравнению с четырехру-
порным облучателем?

5.88. Какие функции выполняют в радиолокации антенны с вращающейся поляризацией? Описать принцип получения волн с круговой поляризацией путем расщепления в фидерном тракте АФУ линейно-поляризованной волны.

5.89. Перечислить и обосновать требования, предъявляемые к антеннам летательных аппаратов.

5.90. Описать назначение и состав антенного блока самолетной метеонавигационной РЛС.

5.91. Описать сдвоенный отражатель и облучатель параболической антенны самолетной метеонавигационной РЛС.

5.92. Описать схему коммутации режимов антенны самолетной метеонавигационной РЛС. Привести технические данные антенны.

Библиографический список

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. II. Антенны. М.: Радио и связь, 1982.

2. Техническая электродинамика и антенны. Ч.2. Антенны: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Красюка. ЛИАП. Л., 1992.

3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988.

4. *Дорохов А. П.* Расчет и конструирование антенно-фидерных устройств. Харьков. Изд-во Харьковск. ун-та, 1960.
5. *Кюн Р.* Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967.
6. *Марков Г. Т., Сазонов Д. М.* Антенны. М.: Энергия, 1975.
7. *Власов В. И., Берман Я. И.* Проектирование высокочастотных узлов радиолокационных станций. Л.: Судпромгиз, 1961.

6. ВОЛНОВОДЫ И ИХ СОГЛАСОВАНИЕ С НАГРУЗКОЙ

6.1. Характеристики и параметры волноводов

6.1. Имеется стандартный прямоугольный волновод с поперечными размерами $a = 48$ см, $b = 2,4$ см. Определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$ для волн типа H_{10} , H_{20} , H_{01} , H_{21} , H_{11} , E_{11} , E_{12} , H_{12} .

Решение. Критическая длина волны в волноводе для волн типа H_{mn} , E_{mn} :

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}.$$

Ответ. Результаты расчета сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Тип волны	H_{10}	H_{20}	H_{21}	H_{01}	H_{11}	E_{11}	E_{12}	H_{12}
$\lambda_{кр}$, см	9,60	4,80	3,20	4,80	4,29	4,29	2,33	2,33

6.2. Какой минимальный диаметр d_{\min} должен иметь круглый волновод для передачи электромагнитных колебаний с частотой 10 ГГц (10000 МГц) при следующих типах волн: H_{11} , E_{01} , H_{21} , H_{01} и H_{31} ?

Ответ. Результаты расчета сведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Тип волны	H_{11}	E_{01}	H_{21}	H_{01}	H_{31}
d , см	>1,75	>2,29	>2,97	>3,66	>4,11

6.3. Прямоугольный волновод МЭК-100 имеет поперечные размеры: $a = 22,86$ мм, $b = 10,16$ мм; по нему передается волна типа H_{10} с частотой $f = 10000$ МГц. Требуется определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$, фазовую V_{ϕ} и групповую $V_{гр}$ скорости, а также длину волны в волноводе Λ .

МЭК-100 – это один из стандартных волноводов, рекомендованных Международной электротехнической комиссией (МЭК). Цифра в обозначении волновода должна быть умножена на 100 МГц и тогда будет получена средняя частота рекомендуемого рабочего диапазона.

Решение. Фазовая скорость в волноводе

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}.$$

Групповая скорость в волноводе

$$V_{гр} = C \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2},$$

где $C = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Ответ. $\lambda_{кр} = 45,7$ мм; $V_{ф} = 4,123 \cdot 10^8$ м/с; $V_{гр} = 2,183 \cdot 10^8$ м/с; $\Lambda = 4,12$ см.

6.4. Прямоугольный волновод МЭК-400 имеет внутренние размеры поперечного сечения : $a = 5,690$ мм, $b = 2,845$ мм. По нему передается волна типа H_{10} с частотой 40 ГГц. Определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$, фазовую $V_{ф}$ и групповую $V_{гр}$ скорости, а также длину волны в волноводе Λ .

Ответ. $\lambda_{кр} = 11,4$ мм; $V_{ф} = 3,988 \cdot 10^8$ м/с; $V_{гр} = 2,256 \cdot 10^8$ м/с; $\Lambda = 1$ см.

6.5. Определить волновое сопротивление Z_B прямоугольного волновода МЭК-40 ($a = 58,17$ мм, $b = 29,083$ мм), а также эквивалентное сопротивление Z'_B , определяемое через напряжения и токи, при условии, что по волноводу передается волна H_{10} с частотой 4 ГГц.

Решение. Волновое сопротивление волновода, вычисленное через напряженности полей, для волн типа H_{mn}

$$Z_B = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}.$$

Эквивалентное (волновое) сопротивление волновода, вычисленное через напряжения и токи, для волны H_{10} :

$$Z'_B = \frac{\pi b}{2a} \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}.$$

Ответ. $Z_B = 493,1$ Ом; $Z'_B = 379,2$ Ом.

6.6. Прямоугольный волновод МЭК-500 ($a = 4,775$ мм, $b = 2,388$ мм) на волне H_{10} имеет волновое сопротивление $Z_B = 483$ Ом. Определить частоту волны и эквивалентное сопротивление волновода Z'_B , вычисленное по напряжению и току.

Ответ. $f = 50$ ГГц; $Z'_B = 379,2$ Ом.

6.7. Определить длину волны, волновое сопротивление и коэффициент затухания в медном (проводимость $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м) круг-

лом волноводе с внутренним диаметром $d = 25,4$ мм при распространении в нем волны типа E_{01} с длиной волны в свободном пространстве $\lambda = 3$ см.

Решение. Критическая длина волны $\lambda_{кр} = 1,31D = 1,31 \cdot 25,4 = 33,3$ мм. Длина волны в волноводе

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{3}{\sqrt{1 - (3/33,3)^2}} = 6,88 \text{ см.}$$

Волновое сопротивление волновода

$$Z_B = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{377}{0,436} = 864,6 \text{ Ом.}$$

Коэффициент затухания в волноводе при волне E_{01}

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}}{60\pi d \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi 4\pi \cdot 10^{-7}}{5,8 \cdot 10^7}}}{60\pi d \sqrt{1 - (\lambda/1,31d)^2}} =$$

$$= 0,002 \text{ Нп/м} = 0,017 \text{ дБ/м.}$$

6.8. Определить допустимую для передачи по прямоугольному волноводу МЭК-120 ($a = 19,050$ мм, $b = 9,525$ мм) мощность при наличии в нем волны типа H_{10} с длиной волны в воздухе $\lambda = 2,5$ см и коэффициенте стоячей волны (КСВ) $k_{с.в} = 2,04$. Рассчитать также коэффициент затухания в волноводе, если бы последний был изготовлен из меди, латуни, алюминия или покрыт серебром.

Полагаем, что допустимая мощность $P_{доп}$ составляет 25% от предельной мощности $P_{пред}$.

Решение. Предельная мощность, выше которой возникает пробой в волноводе, рассчитывается по формуле

$$P_{пред} = \frac{6,63 \cdot 10^{-4} E_{проб}^2 ab}{k_{с.в}} \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}$$

$$P_{\text{пред}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 19,05 \cdot 9,525 \cdot 10^{-6}}{2,04} \times \\ \times \sqrt{1 - (25/2 \cdot 19,05)^2} = 400 \text{ кВт},$$

где $E_{\text{проб}} = 30 \text{ кВ/см} = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ – пробивная напряженность поля в воздухе при нормальных условиях.

Так как в реальных условиях волновод не однороден, а там, где нарушается однородность, создается усиленная концентрация электрического поля, целесообразно считать допустимой для передачи по волноводу мощность, которая составляет не более 25% предельной мощности. Поэтому считаем допустимой мощность $P_{\text{доп}} = 0,25 \cdot 400 = 10 \text{ кВт}$.

Теперь вычислим коэффициент затухания волновода, изготовленного из меди ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 = 1/\text{Ом} \cdot \text{м}$).

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{377 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}} = 6,91 \cdot 10^{-10} \sqrt{f} \frac{\left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}};$$

$$\alpha = 6,91 \cdot 10^{-10} \sqrt{12 \cdot 10^9} \frac{\left[1 + \frac{2 \cdot 9,525}{19,05} \left(\frac{25}{2 \cdot 19,05} \right)^2 \right]}{9,525 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - \left(\frac{25}{2 \cdot 19,05} \right)^2}} = \\ = 1,511 \cdot 10^{-2} \text{ Неп/м} = 0,131 \text{ дБ/м}.$$

В соответствии со значениями проводимости латунных, алюминиевых и покрытых серебром волноводов нужно ввести в эту формулу коэффициенты соответственно 1,92; 1,25; 0,97, т. е. в данном случае получим $\alpha = 0,252$; 0,164; 0,127 дБ/м.

6.9. Вычислить предельную и допустимую мощности для прямоугольного волновода МЭК-100 ($a = 22,86 \text{ мм}$ и $b = 10,16 \text{ мм}$) при распространении в нем волны H_{10} с частотой 9,84 ГГц. Расчет допустимой

мощности произвести применительно к самолетной аппаратуре и высоте полета $h = 15$ км (табл. 6.3).

Таблица 6.3

h , км	0	3	6	9	12	15
$P_{\text{доп}}$, % от $P_{\text{пред}}$	100	50	27	13	5	2

Ответ. $P_{\text{пред}} = 1,08$ МВт; $P_{\text{доп}} = 5,39$ кВт.

6.10. Вычислить коэффициент затухания по данным задачи 6.9.

Ответ. $\alpha = 0,16$ дБ/м.

6.11. Определить критическую длину волны в круглом волноводе, в котором распространяются волны H_{11} с частотой 10 ГГц при длине волны в волноводе $\Lambda = 4,5$ см.

Ответ. $\lambda_{\text{кр}} = 4$ см.

6.12. Вычислить пробивную и допустимую мощности и коэффициент затухания волн в прямоугольном медном волноводе с внутренними размерами $a = 23$ мм, $b = 10$ мм на максимальной волне рабочего диапазона $\lambda_{\text{max}} = 4,1$ см. Расчет произвести для двух случаев: а) волновод эксплуатируется на земле; б) волновод эксплуатируется в воздухе на высоте 12 км (табл. 6.3). В обоих случаях КСВ равен 1.

Решение. Предельная мощность в волноводе

$$P_{\text{пред}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-4} E_{\text{проб}}^2 ab}{k_{\text{с.в}}} \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}.$$

$$P_{\text{пред}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 23 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2}}{1} \sqrt{1 - (4,1/4,6)^2} = 0,62 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Допустимая мощность при эксплуатации волновода на земле

$$P_{\text{доп}} = 0,25 \cdot 0,62 = 0,155 \text{ МВт}.$$

Допустимая мощность с увеличением высоты полета самолета понижается, так как с разрежением воздуха пробивная напряженность поля уменьшается, после чего вновь возрастает. Согласно табл. 6.3 в данном случае (при $h = 12$ км) допустимая мощность

$$P_{\text{доп}} = 0,05 \cdot 0,155 = 0,775 \cdot 10^{-2} \text{ МВт} = 7,75 \text{ кВт}.$$

Коэффициент затухания в волноводе рассчитывается по формуле, приведенной в задаче 6.8:

$$\alpha = 6,91 \cdot 10^{-10} \frac{\sqrt{\frac{3 \cdot 10^8}{4,1 \cdot 10^{-2}}}}{10^{-2} \sqrt{1 - \left(\frac{4,1}{2 \cdot 2,3}\right)^2}} \frac{1 + \frac{2,1}{2,3} \left(\frac{4,1}{2 \cdot 2,3}\right)^2}{1} = 0,022 \text{ Нп/м} = 0,19 \text{ дБ/м.}$$

6.2. Согласующие элементы

6.13. Определить размеры поперечного сечения a_c, b_c и длину четвертьволнового трансформатора, согласующего два отрезка прямоугольного волновода, из которых один имеет размеры $a_1 = 19,05$ мм и $b_1 = 9,53$ мм, а другой $a_1 = a_2 = 19,05$ мм и $b_2 = 7,08$ мм (рис. 6.1). По волноводу проходит волна типа H_{10} с частотой 12 ГГц.

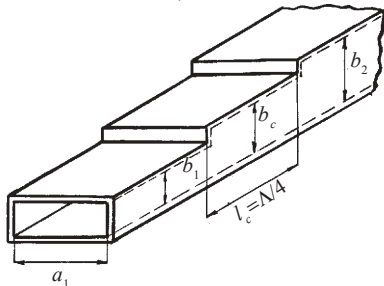


Рис. 6.1

Решение. Для согласования волноводов между эквивалентными (волновыми) сопротивлениями, вычисленными через соотношение напряжения к току, должно соблюдаться такое же соотношение, как между волновыми сопротивлениями отрезков длинной линии, согласуемых посредством четвертьволнового трансформатора:

$$Z_{в.с} = \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}},$$

где

$$Z_{в.с} = \frac{\pi b_c}{2 a_c} \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}; \quad Z_{в1} = \frac{\pi b_1}{2 a_1} \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}};$$

$$Z_{в2} = \frac{\pi b_2}{2 a_2} \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}.$$

Требуемое эквивалентное сопротивление $Z_{в.с}$ устанавливается подбором размера узкой стенки волновода, так как $a_1 = a_2 = a_c$, следовательно, критическая длина волны $\lambda_{кр}$ на всех участках волноводной

линии одинаковая. Это позволяет написать вместо формулы

$$Z_{в,с} = \sqrt{Z_{в1}Z_{в2}} \text{ соотношение } b_c = \sqrt{b_1b_2} = \sqrt{9,53 \cdot 7,08} = 8,27 \text{ мм.}$$

Поскольку $\lambda_{кр} = 2 a_c = 38,1$ мм, длина волны в волноводе

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{25}{\sqrt{1 - (25/38,1)^2}} = 34,6 \text{ мм.}$$

Следовательно, длина согласующего отрезка волновода равна $l_c = \Lambda/4 = 8,65$ мм.

6.14. Рассчитать размеры b_c и l_c четвертьволнового трансформатора, согласующего два отрезка прямоугольного волновода с размерами поперечных сечений: $a_1 = a_2 = 22,86$ мм; $b_1 = 10,16$ мм; $b_2 = 11,41$ мм. По волноводу передаются волны типа H_{10} с частотой 10 ГГц.

Ответ. $b_c = 10,76$ мм; $l_c = 9,94$ мм.

6.15. Определить место включения и глубину погружения согласующей диафрагмы в волновод ($a = 2,29$ см; $b = 1,02$ см; $\lambda = 3$ см; $\lambda_{кр} = 4,58$ см; $\Lambda = 3,97$ см; $Z_{в} = 499,3$ Ом), если известно место расположения минимума поперечной составляющей напряженности электрического поля и что $k_{с,в} = 2,4$. На рис. 6.2, а, б изображена симметричная индуктивная диафрагма и поле в волноводе в месте ее включения. На рис. 6.2, в, г соответственно приведена емкостная диафрагма и поле в волноводе в месте ее включения.

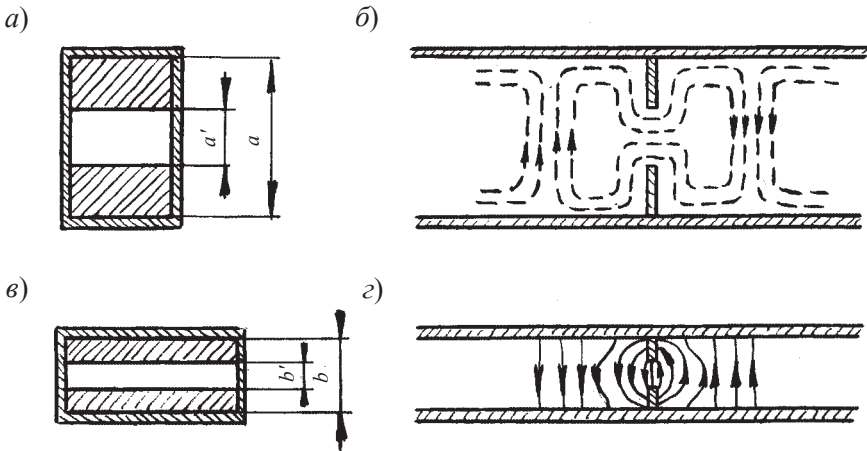


Рис. 6.2

Решение. 1. Находим на круговой диаграмме (рис. 6.3) точку, характеризующую входную проводимость волновода в месте расположения минимума электрического поля. Так как в данном случае $k_{с.в} = 2,4$, то в месте расположения минимума электрического поля входное сопротивление волновода чисто активная величина

$$Z_{вх\min} = R_{вх\min} = Z_B / k_{с.в} = Z_B / 2,4$$

или нормированное значение сопротивления

$$r_{вх\min} = R_{вх\min} / Z_B = 1/2,4,$$

нормированная входная проводимость $g_{вх\max} = 2,4$, что соответствует точке *A*.

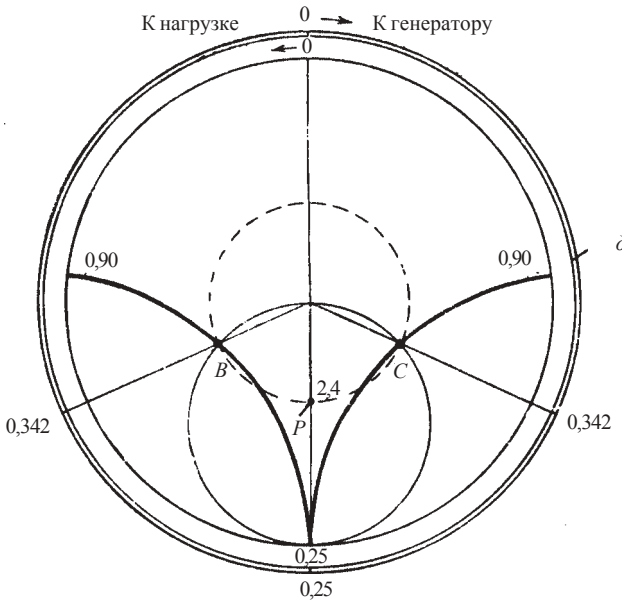


Рис. 6.3

2. Определяем расстояние от минимума напряженности электрического поля до места включения диафрагмы. Диафрагма должна находиться в сечении с нормированной активной проводимостью $g = 1$, а поэтому для определения требуемого расстояния следует совершить поворот по окружности КСВ, равного 2,4, до пересечения с окружностью $g = 1$.

Наличие двух точек пересечения *B* и *C* указывает на возможность согласования волновода при помощи индуктивной (точка *C*) и емкост-

ной (точка B) диафрагм. Прямые, проведенные через центр диаграммы и точки B, C , пересекают шкалу d в положении $0,342\lambda$, причем точке B соответствует шкала отсчета к генератору, а точке C – к нагрузке.

Следовательно, индуктивная диафрагма должна быть включена на расстоянии $(0,342 - 0,25)\lambda = 0,092 \cdot 3,97 = 0,365$ см, которое отсчитывается от сечения волновода с минимальной напряженностью электрического поля в направлении к нагрузке, с тем чтобы компенсировать имеющуюся здесь реактивную составляющую входной проводимости

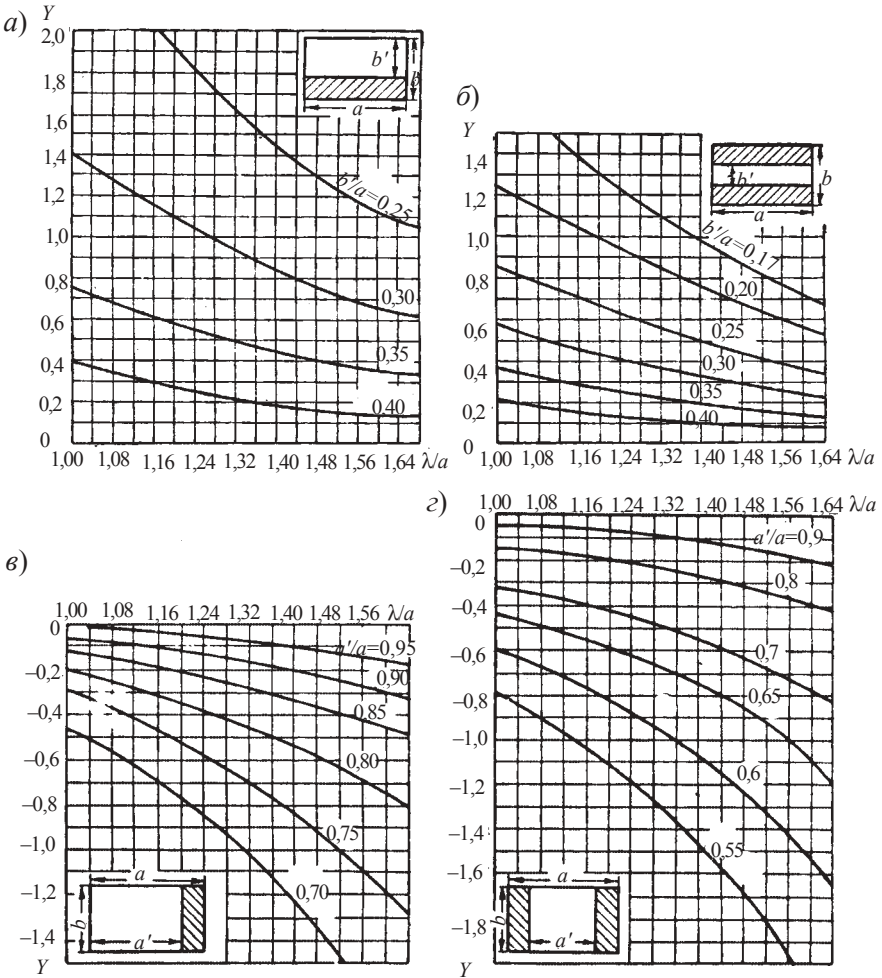


Рис. 6.4

емкостного характера. Емкостная диафрагма должна быть расположена на равном расстоянии по направлению к генератору.

3. Определяем размеры и характер диафрагм. Согласно положению точек B и C на диаграмме нормированная проводимость диафрагм равна $0,9$. В данном случае отношение $\lambda/a = 3/2,29 = 1,31$. На основании этих данных устанавливаем по графикам (рис. 6.4, a , b), что в случае применения симметричной емкостной диафрагмы $b'/a = 0,195$, откуда $b' = 0,195a = 0,195 \cdot 2,29 = 0,45$ см и глубина погружения

$$\frac{b-b'}{2} = \frac{1,02-0,45}{2} = 0,28 \text{ см.}$$

В случае применения несимметричной емкостной диафрагмы $b'/a = 0,305$, откуда $b' = 0,305a = 0,305 \cdot 2,29 = 0,698$ см и глубина погружения $(b-b')$ соответственно равна $(1,02-0,698) = 0,322$ см.

6.16. Определить место включения и глубину погружения индуктивной согласующей диафрагмы в волновод с внутренними размерами $a = 23$ мм и $b = 10$ мм, если известно сечение, в котором поперечная составляющая напряженности электрического поля имеет минимум и что $k_{с.в} = 4$. Длина волны в воздухе $\lambda = 3,2$ см.

Ответ. Симметричная индуктивная диафрагма должна быть расположена на расстоянии $0,074 \cdot 44,5 = 3,9$ мм от сечения минимума поперечной составляющей напряженности электрического поля в направлении к нагрузке. Глубина погружения диафрагмы $5,05$ мм (рис. 6.4, $в$, $з$).

6.3. Коаксиально-волноводный переход

6.17. Прямоугольный волновод с внутренними размерами $a = 23$ мм и $b = 10$ мм, возбуждается на волне типа H_{10} вибратором, к которому подводится питание через коаксиальную линию, имеющую волновое сопротивление $Z_{в.ф} = 50$ Ом (рис. 7.2). Длина волны в воздухе $\lambda = 3,2$ см. Требуется вычислить длину вибратора l_1 и размеры l_2 и y_0 , определяющие его положение в волноводе.

Решение. 1. Длина волны в волноводе

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

2. Волновое сопротивление волновода

$$Z_B = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{377}{\sqrt{1 - (3,2/4,6)^2}} = 524 \text{ Ом.}$$

3. Сначала определяем действующую высоту вибратора h_d , предполагая, что последний находится в середине широкой стенки волновода ($y_0 = a/2$) и на расстоянии $l_2 = \Lambda/4$ от короткозамкнутого поршня. По условию согласования коаксиальной линии с волноводом активная составляющая входного сопротивления штыря должна быть равна волновому сопротивлению коаксиального фидера $Z_{в.ф}$:

$$\frac{2h_d^2}{ab} Z_B \sin^2\left(\frac{\pi}{a} y_0\right) \sin^2(\beta_B l_2) = Z_{в.ф},$$

откуда получим

$$\begin{aligned} h_d &= \sqrt{\frac{Z_{в.ф} ab}{2Z_B \sin^2\left(\frac{\pi}{a} y_0\right) \sin^2(\beta_B l_2)}} = \\ &= \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{4}\right)}} = 3,31 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Этой действующей высоте соответствует геометрическая длина l_1 , которую можно найти из формулы

$$h_d = \frac{\text{tg} \frac{\beta l_1}{2}}{\beta} = \frac{\lambda}{2\pi} \text{tg} \frac{\pi l_1}{\lambda}.$$

Отсюда находим

$$l_1 = \frac{\lambda}{\pi} \text{arctg} \frac{2\pi h_d}{\lambda} = \frac{3,2}{180} \text{arctg} \frac{6,28 \cdot 3,31}{32} = 5,9 \text{ мм.}$$

4. Как видим, расстройка вибратора велика, поскольку его длина l_1 существенно отличается от $\lambda/4 = 8$ мм. В целях увеличения l_1 при сохранении условия $R_{вх} = Z_{в.ф}$ смещаем вибратор к одной из узких стенок волновода. Принимаем $y_0 = 0,25a$ и тогда получим

$$h_{\text{д}} = \sqrt{\frac{Z_{\text{в.ф}} ab}{2Z_{\text{в}} \sin^2\left(\frac{\pi}{a} y_0\right) \sin^2(\beta_{\text{в}} l_2)}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right)}} = 4,68 \text{ мм},$$

а

$$l_1 = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi h_{\text{д}}}{\lambda} = \frac{3,2}{180} \operatorname{arctg} \frac{6,28 \cdot 4,68}{32} = \frac{32 \cdot 42,5}{180} = 7,56 \text{ мм}.$$

Принимаем радиус провода вибратора $r = 1,6$ мм и вычисляем волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{в.в}} = 60 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi r} - 0,577 \right) = 60 \left(2,31 \lg \frac{32}{3,14 \cdot 1,6} - 0,577 \right) = 60 \cdot 1,88 = 112,8 \text{ Ом}.$$

Поскольку вибратор не настроен в резонанс $\left(l_1 < \frac{\lambda}{4} \right)$, наряду с сопротивлением излучения R_{Σ} вибратор содержит X_{Σ} – реактивную составляющую

$$X_{\Sigma} = -Z_{\text{в.в}} \operatorname{ctg} \beta l_1 = -112,8 \operatorname{ctg} \left(\frac{360^{\circ} \cdot 7,56}{32} \right) = 112,8 \cdot 0,0875 = -9,87 \text{ Ом}.$$

Для того чтобы компенсировать это сопротивление, нужно изменить расстояние l_2 от поршня до вибратора в соответствии с формулой

$$X_{\text{вх}} = \frac{h_{\text{д}}^2}{ab} Z_{\text{в}} \sin^2\left(\frac{\pi}{a} y_0\right) \sin(2\beta_{\text{в}} l_2) + X_{\Sigma} = 0,$$

откуда

$$\sin(2\beta_{\text{в}} l_2) = \frac{-X_{\Sigma} ab}{h_{\text{д}}^2 Z_{\text{в}} \sin^2\left(\frac{\pi y_0}{a}\right)} = \frac{9,87 \cdot 10 \cdot 23}{4,682 \cdot 524 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 0,25a}{a}\right)} = 0,422;$$

$$2\beta_{\text{в}}l_2 = 115^{\circ}; \quad l_2 = \frac{44,5 \cdot 115}{2 \cdot 360} = 7,1 \text{ мм.}$$

За счет неравенства $l_2 < \frac{\lambda}{4}$ действующая высота вибратора отличается от вычисленного значения $h_{\text{д}} = 4,68$ мм примерно на 10%. В данном случае нет необходимости уточнять расчет. Если же это требуется, то можно применить метод последовательных приближений.

Библиографический список

1. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1970.
2. *Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П.* Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов.радио, 1967.
3. *Григорьев А. Д.* Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высш. шк., 1990.
4. Техническая электродинамика и антенны. Ч. 1. Электродинамика: Учеб. пособие/ Под ред. *В. Н. Красюка.* ЛИАП, Л., 1991.

7. ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ АНТЕННО-ФИДЕРНОГО ТРАКТА

7.1. Сочленения волноводов и переходы на разные типы линий

7.1. Перечислить устройства и узлы антенно-фидерного тракта импульсной РЛС (рис. 7.1).

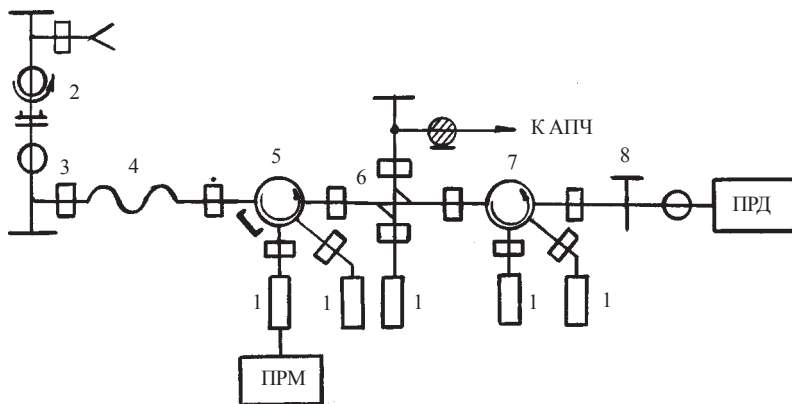


Рис. 7.1

7.2. Перечислить схемы связи, которые применяются в переходах, предназначенных для возбуждения и приема электромагнитных колебаний. Какие требования предъявляются к таким переходам?

7.3. Описать узкополосный зондовый переход с коаксиальной линии на прямоугольный волновод $T^{к.л} \rightarrow H_{10}^{п.в}$. Чем достигается здесь распространение волн по волноводу только в направлении его нагрузки? Из каких соображений выбирают высоту зонда (штыря) и его местоположение в продольном и поперечном сечениях волновода?

7.4. Что ограничивает полосу пропускания зондового коаксиально-волноводного перехода? Как устроен широкополосный неперестраиваемый переход?

7.5. Описать волноводно-коаксиальный переход с детектором. Отметить назначение всех элементов перехода и процесс настройки его?

7.6. Описать принцип действия и назначение элементов коаксиально-волноводного перехода, эскиз которого показан на рис. 7.2.

7.7. Пояснить, как происходит трансформация Т-волны в волну H_{10} в прямоугольном волноводе посредством коаксиально-волноводного пе-

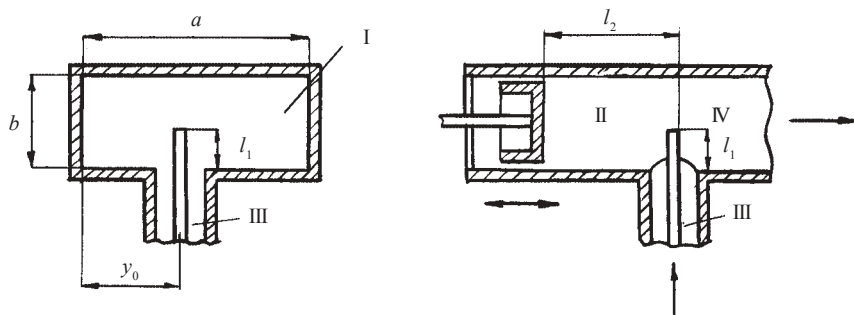


Рис. 7.2

рехода, показанного на рис. 7.2. Какие волны (бегущие или стоячие) образуются в поперечных сечениях I, II, III, IV ? Какова относительная длина отрезков l_1, l_2, y_0 ?

7.8. На рис. 7.3 показаны контактные ($a, б$) и дроссельные ($в, г$) короткозамкнутые поршни прямоугольного волновода ($a, г$) и коаксиального ($б, в$) волноводов. Определить: узлы тока и пучности электрического поля; узлы электрического поля (напряжения) и пучности тока для точек $A, B, C, D, E, G, F, L, M, N$.

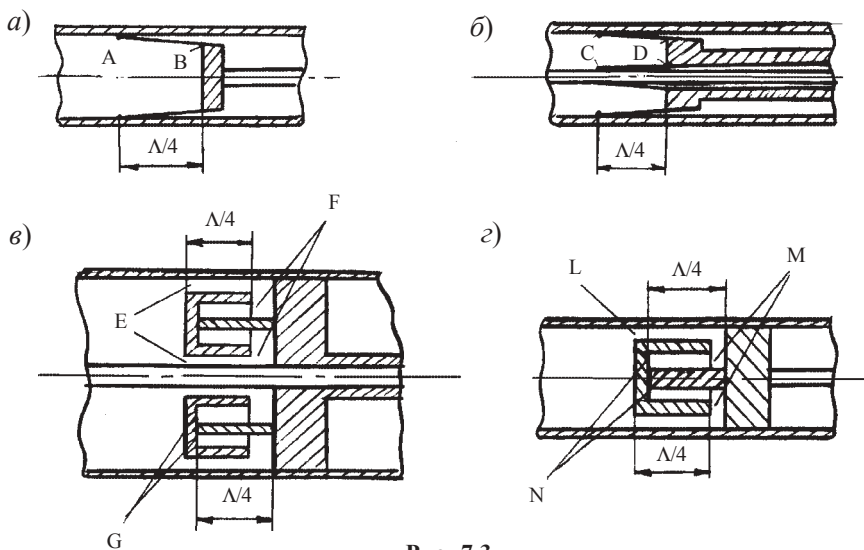


Рис. 7.3

7.9. Описать зондовый переход с трансформацией волны из коаксиальной линии в круглый волновод ($T^{к.л} \rightarrow E_{01}^{к.б}$). Из каких соображений

выбирают диаметр круглого волновода? Благодаря чему поля H_{11} и H_{21} , возбуждаемые в волноводе, не распространяются по нему?

7.10. Описать коаксиально-волноводный переход с магнитной связью.

7.11. Для чего предназначены вращающиеся сочленения. Какого типа волны наиболее пригодны для передачи энергии через такие сочленения?

7.12. Описать вращающиеся сочленения прямоугольных волноводов через отрезки круглого волновода.

7.13. Заполнить пропуски соответствующими словами: *магнитная, зондом, электрическая, противофазе, полей, неоднородность, типов, отверстие (цель), реактивный, заземленной, поперечной, два, зонд (штырь), внутреннего, $\Lambda/4$, полосковым.*

Элементами связи в переходах с преобразованием типа волны являются __ (___), рамка с током и __ (___). В первом случае используется __ связь, во втором – магнитная __ связь и в третьем – электромагнитная. Продолжение __ проводника коаксиальной линии служит __ коаксиально-волноводного перехода. Устройство возбуждения волновода, как и любая-другая __, вызывает кроме основной волны множество __ не основных __. Последние обычно имеют __ характер и не распространяются. В переходе $T^{к.л} \rightarrow H_{20}^{п.в}$ используются __ зонда, которые питаются в __. В переходе $T^{к.л} \rightarrow H_{10}^{п.в}$ с магнитной связью рамку помещают в __ плоскости волновода на расстоянии ___ от коротко замыкающей перемычки. Металлический клин перехода $H_{10}^{п.в} \rightarrow T^{п.п.л}$ соединен с ___ проводником НПЛ, а продолжение нижней стенки волновода служит ___ пластиной НПЛ.

7.14. Перечислить требования, предъявляемые к штепсельным разъемам, контактными и дроссельным фланцам антенно-фидерного тракта (АФТ).

7.15. Описать контактное соединение неподвижных отрезков прямоугольного волновода. Каково назначение всех элементов соединения?

7.16. Имеются конструкции контактных сочленений волноводов, в которых между фланцами расположена тонкая прокладка $З$ с пружинящими лепестками 7 (рис. 7.4, а). Материал прокладки – бериллиевая бронза. Какой эффект дает такая прокладка с лепестками. Перечислить наименование элементов сочленения $1, 2, 4, 5, 6, 8$.

7.17. На рис. 7.4, б приведена схема замещения дроссельного сочленения двухпроводными линиями и распределение тока I в них. Описать дроссельное сочленение неподвижных отрезков волновода. Почему ток смещения, имеющийся в зазоре между фланцами сочленения, возбуж-

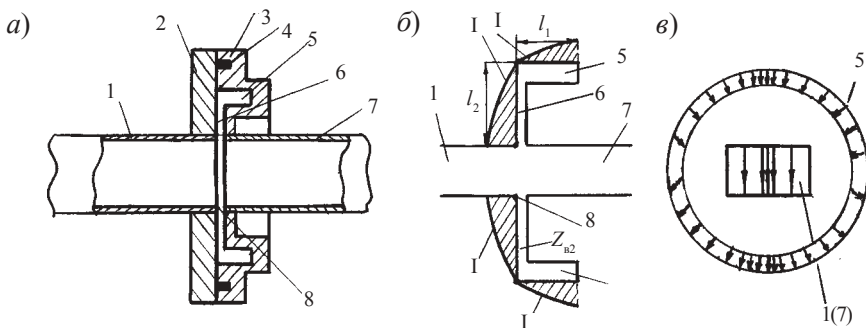


Рис. 7.4

дает в радиальной линии волну Т, а в кольцевой канавке – волну H_{11} ? Как, несмотря на отсутствие гальванического контакта, образуется надежный контакт между внутренними стенками сочленяемых волноводов? Какой ток (узел или пучность) имеется в зазоре δ между волноводными отрезками и в гальваническом контакте фланцев? Что должно быть больше: волновое сопротивление кольцевой канавки Z_{B2} или радиальной линии Z_{B1} ? Каковы размеры длин отрезков l_1, l_2 ?

7.18. Объяснить, почему дроссельные фланцы с кольцевой выточкой по всей окружности (см. рис. 7.3, б) и с неполной выточкой практически не отличаются по своим электрическим свойствам. На рис. 7.4, в показаны электрические поля в области сочленения. Где размещаются на фланцах стягивающие их винты и герметизирующая резиновая прокладка?

7.19. Сравните свойства контактных и дроссельных разъемных сочленений. Указать уровни мощности в децибелах, просачивающейся через эти сочленения?

7.20. Описать гофрированный волновод.

7.21. Описать позвонковый (панцирный) волновод.

7.22. Заполнить пропуски соответствующими словами и цифрами: *контактное, контактные, дроссельное, дроссельные, винтами, прокладки, штифтами, поверхности, 60–80, сдвиги, 90–120, перекосы, механической, разъемные, припаиваются, фланцев, пересборке.*

Известны неразъемные и ___ соединения участков фидерного тракта. Неразъемные соединяемые участки ___ друг к другу. Больше применение получили ___ и ___ разъемные сочленения. Контактное сочленение волноводов производится с помощью плоских ___, которые через отверстия в них стягиваются ___ и дополнительно фиксируются направ-

ляющими _____. Кроме того, используют упругие _____ из бериллиевой бронзы с пружинящими лепестками. Благодаря деформации прокладок обеспечивается хороший электрический _____, если даже соприкасающиеся _____ фланцев неточно притерты. Это приводит к снижению просачиваемой мощности до (_____) дБ. Дроссельное сочленение не требует столь высокого качества _____ обработки, оно допускает небольшие _____ фланцев и небольшие _____ внутренних контуров волноводов. Это ухудшает электрический контакт: просачиваемая мощность в дроссельных сочленениях находится на уровне – (_____) дБ. Все же _____ сочленение предпочтительнее, если фидерный тракт подвергается частой _____.

7.2. Волноводные уголки и изгибы

7.23. Описать одноуголковый и двухуголковый переходы: их классификацию (типы Е и Н), принцип действия, оптимальные размеры, преимущества и недостатки. Какой переход – типа Е или Н – более пригоден для использования в трактах большой мощности?

7.24. Определить оптимальные размеры X , d (простых) одно уголкового переходов типа Н (рис. 7.5, а) и типа Е (рис. 7.5, б), которые введены в прямоугольный волновод $R22$, имеющий поперечные размеры: $a = 110$ мм, $b = 55$ мм.

Решение. Оптимальные соотношения между размерами одноуголкового волноводного перехода типа Н: $d = 0,93 a$, $X = 0,6 - 0,7a$, а типа Е – $d = 0,86 b$, $X = 0,4b$.

1. Определяем размеры d и X перехода типа Н:

$$d = 0,93 a = 0,93 \cdot 110 = 102,3 \text{ мм},$$

$$X = 0,65 a = 0,65 \cdot 110 = 71,5 \text{ мм}.$$

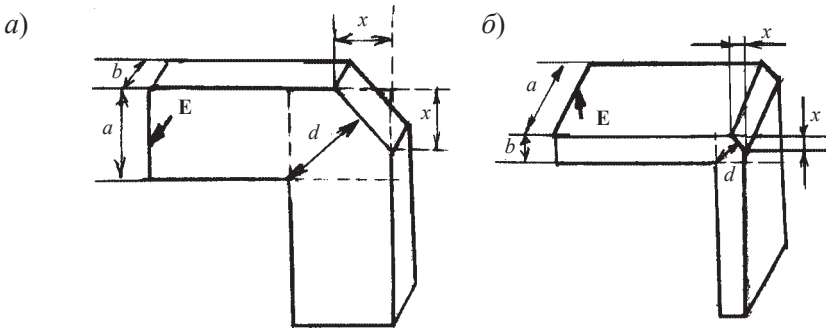


Рис. 7.5

2. Размеры d и X перехода типа Е:

$$d = 0,86b = 0,86 \cdot 55 = 41,3 \text{ мм};$$

$$X = 0,4b = 0,4 \cdot 55 = 22 \text{ мм}.$$

7.25. Определить оптимальные размеры X , d одноуголковых переходов типа Н (рис. 7.5, а) и типа Е (рис. 7.5, б) прямоугольного, волновода $R220$ с поперечными размерами $a = 10,7$ мм, $b = 5,3$ мм.

Ответ. Для перехода типа Н: $d = 9,95$ мм; $X = 6,96$ мм; для типа Е: $d = 4,56$ мм; $X = 2,12$ мм.

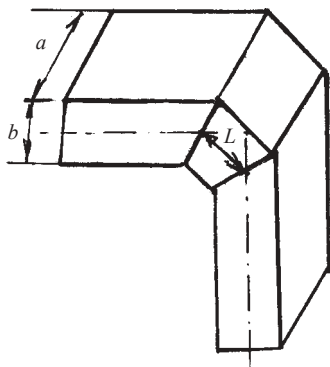


Рис. 7.6

7.26. Один из участков АФТ содержит прямоугольный волновод, в котором имеется двухуголковый (двойной) E -плоскостной переход. Частота распространяемых волн $f = 10$ ГГц. Определить оптимальный размер L (рис.7.6) перехода, если поперечные размеры волновода с волной H_{10} ($a = 23$ мм, $b = 10$ мм.).

Ответ. $L = 9,9$ мм,

7.27. Описать волноводные изгибы, их преимущества и недостатки по сравнению с уголковыми переходами.

7.28. Длину плавных изгибов рекомендуется выбирать порядка трех–пяти полуволн в волноводе. Пояснить, почему этот оптимальный размер кратен полуволне?

Решение. Длина волны в изогнутом волноводе с достаточной для практики точностью может считаться равной длине волны в прямом волноводе. Волновое сопротивление изогнутого волновода больше волнового сопротивления прямого волновода. Различие тем больше, чем меньше радиус изгиба. Коэффициенты отражения на входе и выходе изгиба имеют одинаковый модуль, а по фазе отличаются на π , так как имеет место переход от меньшего волнового сопротивления к большему сопротивлению. Поэтому для компенсации отражений от сечений изгиба на входе и выходе, расстояние между сечениями, измеренное вдоль средней линии, должно быть кратным целому числу полуволн, так как при этом разность фаз за счет разности хода между отраженными от сечений волн будет равна нулю.

7.29. С какой целью производят кручение волноводов? Как влияет длина L крученого участка на КСВ в волноводе? При какой относительной длине можно получить $k_{с.в} \leq 1,1$?

7.30. Начертить топологические схемы уголкового и плавного изгибов микрополосковой линии (МПЛ), обозначить на схемах оптимальные размеры изгибов.

7.31. Заполнить пропуски соответствующими словами: *плавного, отражающих, направления, 45°, 90°, электрические, магнитные, E, H, плоскости, поляризации, двух, волны, полуволн, скрутки, поворота.*

Угловые переходы предназначены для изменения ___ передачи энергии. Если в ___ изгиба полностью расположены ___ силовые линии, то переход называется *H*-плоскостным, а если ___ силовые линии, то *E*-плоскостным. По количеству ___ стенок в переходе различают одно- и двухуголковые переходы. В одноуголковом переходе направление волны сразу же изменяется на ___, в двух уголковом – каждая из ___ ступенек осуществляет поворот на ___. Электрическая прочность ___ изгибов выше, чем ___ изгибов. Волноводная скрутка предназначена для ___ плоскости ___ волны. Оптимальная средняя длина ___ изгиба и ___ равна целому числу ___.

7.3. Фильтрующие элементы

7.32. Определить для каждой решетки из проводящих пластин (рис. 7.7, *a, б, в, г*), какой тип волны в круглом (H_{11}, E_{01}, H_{01}) и прямоугольном волноводах (H_{01}) она подавляет, имея в виду, что пластины отсекают (отражают) те волны, электрические силовые линии которых совпадают с поверхностью пластин.

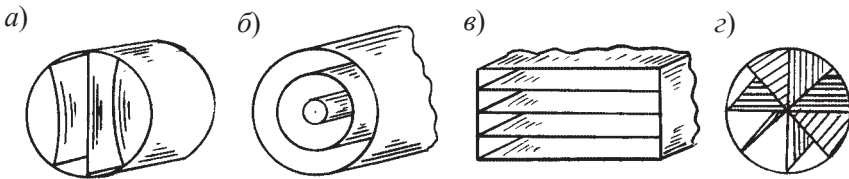


Рис. 7.7

7.33. Описать волноводный и коаксиальный проходные резонаторы.

7.34. Описать одиночные резонаторы на полосковых и микрополосковых линиях.

7.35. Составить эквивалентную схему полосно-пропускной фильтра (ППФ) с четвертьволновыми связями и сопоставить с прототипом ППФ из элементов с сосредоточенными параметрами.

7.36. Описать ППФ с четвертьволновыми связями, построенные на основе волноводной и полосковой линий передачи.

7.37. Описать структуру полей в одном звене связанных полосковых линий (ПЛ). Как индуцируются синфазная и противофазная волны? В каком соотношении находятся волновые сопротивления полосковых линий для этих волн?

7.38. Составить схему ППФ на связанных полосковых линиях и обновать частотную характеристику этого фильтра.

7.39. На рис. 7.8, а изображены топологические схемы СВЧ-фильтров: нижних и верхних частот, полосно-пропускающего и полосно-заграждающего. Приведите эти схемы к их прототипам с сосредоточенными параметрами (см. рис. 7.7, б).

7.40. В СВЧ-фильтре нижних частот на полосковых линиях (рис. 7.8) участки линии с высокоомным волновым сопротивлением $Z_{\text{ш}}$ служат последовательной индуктивностью, а с низкоомным $Z_{\text{ш}}$ – параллельной емкостью. С какой целью устанавливается такое соотношение между волновыми сопротивлениями участков линии и как оно реализуется?

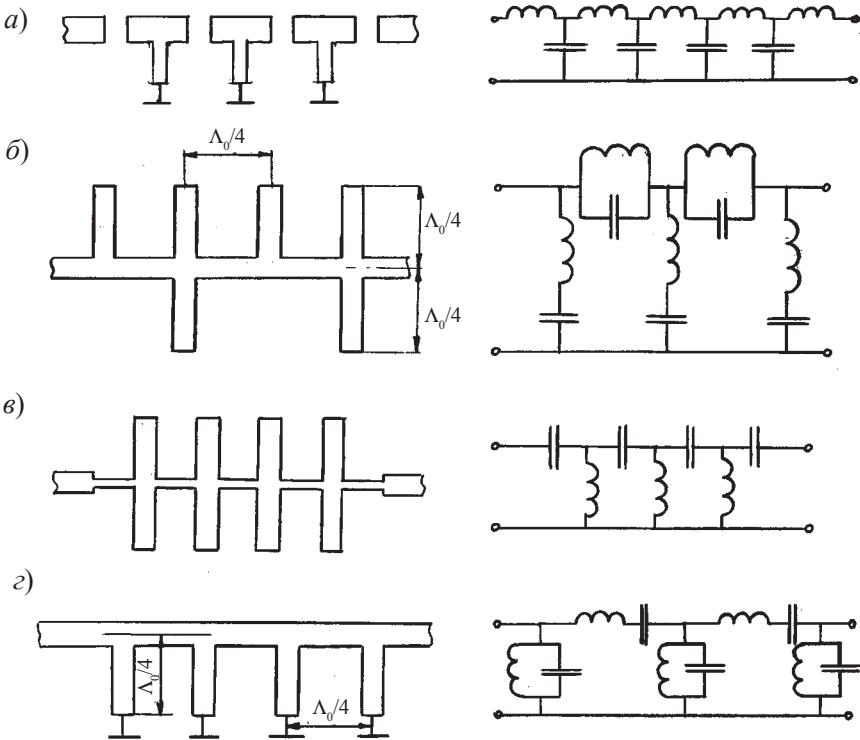


Рис. 7.8

Решение. В данном случае используются короткозамкнутые шлейфы с индуктивным сопротивлением

$$j\omega L = jZ_{\text{ш}} \operatorname{tg}(\beta l_{\text{ш}}) = jZ_{\text{ш}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_{\text{ш}}}{\Lambda}\right)$$

и разомкнутые шлейфы с емкостной проводимостью равной

$$j\omega C = j / Z_{\text{ш}} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_{\text{ш}}}{\Lambda}\right) = j \operatorname{tg}(2\pi l_{\text{ш}} / \Lambda) / Z_{\text{ш}}.$$

Следовательно, для уменьшения длины шлейфов $l_{\text{ш}}$ нужно, чтобы в первом случае его волновое сопротивление $Z_{\text{ш}}$ было большим, а во втором – малым. Реализуется это тем, что индуктивный шлейф изготавливают с тонким полосковым проводником и, следовательно, малой погонной емкостью, а емкостный шлейф – наоборот.

7.4. Тройники и мосты СВЧ

7.41. Как классифицируются волноводные тройники? Описать Т-образные волноводные тройники Е- и Н-типов и нарисовать эквивалентные схемы этих тройников.

7.42. Почему тройники необходимо внутренне согласовывать со стороны Е- и Н-плеч? Как выполняется это согласование?

7.43. Описать двойные волноводные тройники (двойные Т-мосты). Дать определения первичного и вторичных (рабочего и нерабочего) плеч моста. Какое свойство двойного Т-моста позволяет отнести его к группе гибридных соединений?

7.44. Описать, как применяется двойной тройник для измерения коэффициента отражения (или КСВ).

7.45. Описать принцип действия и свойства кольцевых гибридных мостов. Каково оптимальное соотношение поперечных размеров кольца и плеч моста?

7.46. Описать принцип действия и свойства квадратных гибридных мостов. Составить эквивалентную схему квадратного моста на основе двухпроводных линий. В каком соотношении находятся волновые сопротивления этих линий? Показать, что квадратный мост гибридный и к тому же квадратурный.

7.47. Описать конструкцию волноводно-щелевого моста и пояснить, что при соответствующих размерах щели мост является трехдецибельным, а два плеча его развязанные.

7.48. Как осуществляется согласование в волноводно-щелевых мостах? Отметить достоинства таких мостов по сравнению с двойным тройниковым и кольцевым мостами.

7.49. Дать определение понятия “направленный ответвитель” (НО). Показать, что гибридное и мостовое соединения – частные случаи НО.

7.50. Перечислить качественные показатели направленных ответвителей и записать математически эти показатели.

7.51. Направленный ответвитель (НО) создает переходное ослабление в прямом направлении $L_{12} = 3$ дБ и имеет направленность основного выходного плеча относительно изолируемого $L_n^{(2)} = 30$ дБ. Какова развязка между входным и изолируемым плечами НО?

Ответ. 27 дБ.

7.52. Описать принцип работы направленного ответвителя с двумя и тремя отверстиями связи в общей узкой стенке двух прямоугольных волноводов. Сравнить их характеристики в полосе частот.

7.53. Рассмотреть условие согласования волновых сопротивлений ответвителя на связанных линиях. Из каких соображений устанавливаются коэффициент связи ответвителя?

7.54. Отметить конструктивные особенности и достоинства противонаправленных мостов.

7.55. Сравнить технические показатели следующих интегральных схем СВЧ: гибридного кольца, двухшлейфного и трехшлейфного НО и противонаправленного моста.

7.56. Заполнить пропуски соответствующими словами: *развязаны, фазе, противофазе, не, квадратурный, компактностью, последовательного, параллельного, двойной, поровну, узкополосный, трехдецибельный.*

Эквивалентная схема Е-тройника имеет вид __ соединения, а Н-тройника – __ соединения линий (волноводов). __ Т-мост является сочетанием Е- и Н-тройников. В нем Е- и Н-плечи взаимно __, а два других плеча возбуждаются в __ от Е-плеча и в __ от Н-плеча. Входная мощность кольцевого моста разветвляется __ между смежными плечами, а в оставшееся плечо __ поступает. Квадратный гибридный мост __. Волноводно-щелевой мост отличается __ и широкополосностью. Двухдырочный направленный ответвитель __. Противонаправленный мост – это противонаправленный __ ответвитель.

7.5. Ферритовые устройства

7.57. Как классифицируются материалы по их магнитным свойствам? Структуры ферритов типа граната, шпинели и гексагональные.

7.58. Вывести формулы, выражающие зависимость между магнитной проницаемостью μ и коэффициентом восприимчивости среды k_m . Какие значения μ и k_m имеют вакуум, диамагнетики, парамагнетики и ферромагнитные материалы?

7.59. Описать внутренние источники магнитного поля вещества. Что называется магнитным и механическим спиновыми и орбитальными моментами электрона? Какие из этих моментов определяют природу магнетизма?

7.60. Описать намагничивание вещества внешним постоянным магнитным полем. Что называется свободной прецессией и как зависит частота ее от напряженности поля намагничивания вещества?

7.61. Описать процесс вынужденной прецессии спина. Что называется ферромагнитным резонансом?

7.62. Описать взаимодействие линейно поляризованной волны с намагниченным ферритом. Чем различается прецессия электронов, вызываемая волнами левой и правой круговой поляризации?

7.63. Определить частоту ферромагнитного резонанса вещества, намагничиваемого постоянным магнитным полем, напряженность которого $H_0 = 100$ кА/м.

Ответ. $f = 3,5$ ГГц.

7.64. Провести аналогию между комплексной магнитной и диэлектрической проницаемостями среды. Как зависят вещественная и мнимая части комплексной магнитной проницаемости феррита от напряженности постоянного поля намагничивания?

7.65. Какими параметрами оцениваются резонансные свойства ферритов?

7.66. Заполнить пропуски соответствующими словами: *шпинели, спиновыми, механический, стрелке, переменное, прецессия, граната, орбите, по, вынужденная, потерями, сотые, орбитальным, оси, свободная, намагничиванию, комплексной.*

К основным структурам ферритов относятся структуры типа __, типа __ и гексагональная. Электрон атома ферромагнитного вещества, вращаясь по __ и вокруг своей __, обладает __ и спиновым магнитным и механическим моментами. В результате взаимодействия внешнего по-

стоянного магнитного поля и спинового магнитного момента возникает новый ___ момент, под действием которого происходит __ прецессия ___ часовой __. Свободная __, полностью затухает за __ доли микросекунды. Если к постоянному полю прибавляется __ магнитное поле распространяемой волны, то возникает __ прецессия. В __ магнитной проницаемости феррита $\dot{\mu} = \mu' - j\mu''$ составляющая μ' обусловлена способностью среды к ____, а μ'' — __ в ней.

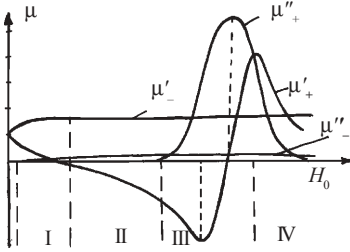


Рис. 7.9

вентиле со смещением поля, Y-циркуляторе, фазовращателях.

7.68. Описать ЖИГ-резонатор, схему и принцип действия ферритового фильтра, выполненного на полосковой линии со связью петлевого типа (рис. 7.10).

Ответ. Главным элементом перестраиваемого фильтра является ферритовый резонатор, который выполняют обычно в виде хорошо отполированных сфер из монокристаллов железоиттриевого граната (ЖИГ-резонатор).

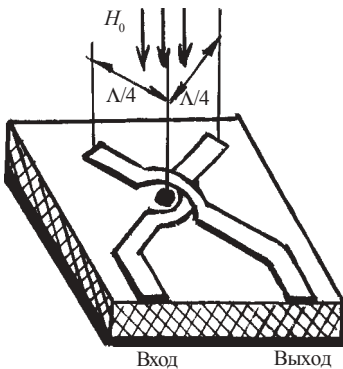


Рис. 7.10

7.67. Описать классификацию ферритовых устройств. На рис. 7.9 показаны зависимости составляющих комплексной магнитной проницаемости феррита правополяризованной (+) и левополяризованной (-) волн $\dot{\mu}_{(\pm)} = \mu'_{(\pm)} - j\mu''_{(\pm)}$ от напряженности постоянного поля намагничивания H_0 . Определить область характеристик, используемых в вентиле с резонансным поглощением, вентиле со смещением поля, Y-циркуляторе, фазовращателях.

Такие резонаторы обладают собственной добротностью $(2-3) \cdot 10^3$. В них используется резонанс правовинтового прецессионного движения спиновых магнитных моментов электронов. Резонансная частота ферритового резонатора определяется соотношением $f_0 = \gamma H_0$, где H_0 — напряженность поля подмагничивания, $\gamma \approx 3,5 \cdot 10^{-2}$ МГц/(А/м). На частотах в стороне от резонанса ферритовый резонатор ведет себя как изотропный магнитодиэлектрический образец

и из-за малых размеров незначительно влияет на режим линии передачи. Лишь в узкой полосе частот вблизи резонанса связь резонатора с линией передачи резко увеличивается, и появляются компоненты электромагнитного поля, отсутствующие в первоначальной структуре волны линии передачи. Именно это явление используется для создания перестраиваемых фильтров СВЧ.

В фильтре на несимметричных полосковых линиях передачи (см. рис. 7.10) две перекрещивающиеся линии при отсутствии гиромагнитного резонанса практически развязаны между собой, поскольку связи через магнитное поле нет. Электрическое же поле в месте пересечения линий минимально, так как точка пересечения расположена на расстоянии $\Lambda/4$ от разомкнутых концов полосковых линий. В точке пересечения между проводниками полосковых линий помещена ферритовая сфера, намагничиваемая управляющим полем H_0 , перпендикулярным плоскости основания полосковой платы. При гиромагнитном резонансе появляется составляющая поля магнитной индукции, продольная возбуждающей линии передачи, что приводит к возникновению сильной связи между полосковыми линиями.

7.69. В ферритовых фильтрах СВЧ наряду с петлевой связью применяется связь, осуществляемая с помощью металлических диафрагм или взаимно-перпендикулярных короткозамкнутых линий передач. Описать полосно-пропускающий фильтр (рис. 7.11) на прямоугольных волноводах, в котором два соосных волновода развернуты один относительно другого на 90° и имеют отверстие в общей торцевой стенке, образующее диафрагму. Ферритовая сфера располагается в центре отверстия. Сфера намагничивается постоянным магнитом с полюсами $N-S$.

Решение. При частотах f , далеких от частоты резонанса f_0 ферритовой сферы, вынужденная прецессия практически отсутствует и падающая на диафрагму с ферритовой сферой волна $\Pi_{\text{пад}}$ полностью отражается ею ($\Pi_{\text{отр}}$). При этом волноводы развязаны из-за ортогональности поляризации их основных волн. Если же частота f волны $\Pi_{\text{пад}}$ близка к f_0 , то возникает интенсивная вынужденная прецессия, в результате чего ферри-

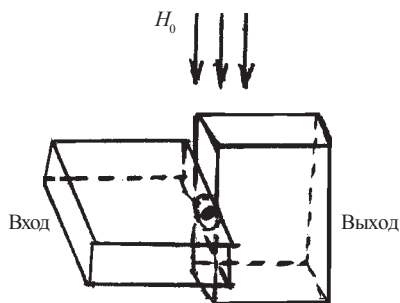


Рис. 7.11

товая сфера вызывает вторичные волны с частотой f . При надлежащих размерах диафрагмы это переизлучение компенсирует отраженные от диафрагмы волны и возбуждает проходящую на выход волну $\Pi_{\text{прох}}$. Как видно, устройство является ППФ с полосой пропускания, зависящей от нагруженной добротности ферритового резонатора.

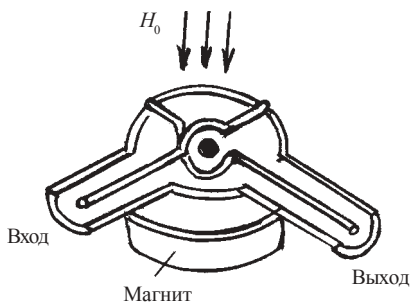


Рис. 7.12

7.70. Описать принцип действия ферритового ППФ на индуктивных петлях (рис. 7.12), который содержит ферритовую сферу, помещенную в центре двух перекрещивающихся рамок, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и связанных с двумя коаксиальными линиями.

Решение. Магнитные поля рамок взаимно ортогональны и передача сигналов между рамками, а следовательно, между входом и выходом отсутствует. При гиромагнитном резонансе намагниченной ферритовой сферы под воздействием на нее магнитного поля первой рамки $H_{\text{вч},x}$ появляется составляющая магнитной индукции $B_{\text{вч},y}$, возбуждающая вторую рамку, и сигнал проходит на выход фильтра.

7.71. Каковы назначения и характеристики циркуляторов СВЧ? Описать устройство и принцип действия поляризационного циркулятора.

7.72. Отметить недостатки, характерные для циркуляторов, основанных на эффекте Фарадея.

7.73. Описать конструкцию и принцип действия волноводного Y -циркулятора. Назначение элементов циркулятора.

7.74. Описать устройство, топологическую схему и принцип действия Y -циркуляторов на полосковых и микро полосковых линиях (ПЛ и МПЛ).

7.75. Сравнить Y -циркуляторы, выполненные на волноводах, ПЛ и МПЛ. Отметить их рабочие диапазоны волн и другие характеристики. Привести примеры Y -циркуляторов с числом плеч более трех.

7.76. Описать фазовращатель Реджиа–Спенсера. Почему в этом фазовращателе не проявляется эффект Фарадея несмотря на продольное намагничивание ферритового стержня? На каком явлении основано изменение фазы проходящей волны в данном случае?

7.77. Описать устройство и принцип действия ферритового невзаимного фазовращателя. Как зависит получаемый невзаимный фазовый

сдвиг от места размещения ферритовой пластины в волноводе? Что называется гиратором?

7.78. Описать устройство и принцип действия фазового циркулятора. Каким полем – продольным или поперечным – намагничиваются ферритовые пластины циркулятора? Обосновать процесс циркуляции волн.

7.79. Каково назначение ферритовых вентиляей? Как составляется антенный переключатель из вентиля и циркулятора?

7.80. Описать устройство и принцип действия вентиля, основанного на эффекте Фарадея.

7.81. Описать устройство и принцип работы вентиля с резонансным поглощением волн. Чем вызвано введение диэлектрической пластины в конструкцию вентиля? Каковы его технические показатели, преимущества и недостатки по сравнению с вентиляем поляризационного типа?

7.82. Описать устройство и принцип действия вентиля, основанного на эффекте смещения поля. Чем объясняется широкое применение вентиляей такого вида?

7.83. Заполнить пропуски соответствующими словами: *размеров, намагничивания, направления, невзаимный, продольно, управляющего, сферы, намагничивания, Фарадея, взаимный, проницаемости, поперечным, круговой.*

ЖИГ-резонатор имеет форму__ диаметром около l мм. Резонансная частота ЖИГ-резонатора прямо пропорциональна напряженности поля ___ феррита и не зависит от его ____. В циркуляторах, основанных на эффекте ____, угол поворота плоскости поляризации не зависит от ___ распространения волны, т.е. эффекта Фарадея ____. Фазовращатель Реджиа–Спенсера – ___ с ___ намагничиваемым стержнем. В нем фаза проходящей волны изменяется благодаря изменению магнитной ___ стержня под воздействием ___ магнитного поля. Ферритовые пластины вентиля с резонансным поглощением размещаются в области ___ поляризации проходящей волны и намагничиваются ___ полем H_0 .

7.6. Антенные переключатели импульсных РЛС

7.84. Описать назначение антенных переключателей (АП) и перечислить требования, предъявляемые к ним. Какого порядка должна быть развязка между передатчиком и приемником в режиме передачи импульсной РЛС, допустимое затухание в режиме приема, время восстановления, полоса пропускания и срок службы АП?

7.85. Описать классификацию антенных переключателей.

7.86. Описать работу АП с широкополосными разрядниками в режиме высокого и низкого уровней мощности. Перечислить достоинства и недостатки таких АП.

7.87. Описать ферритовый антенный переключатель АП, состоящий из щелевого моста, невзаимного фазовращателя и двойного тройника. Чем объясняется широкое применение ферритовых антенных переключателей в современных РЛС?

7.88. Описать работу антенного переключателя на двойных Т-мостах в режимах передачи и приема (рис. 7.13).

Ответ. В режиме передачи мощный зондирующий импульс от генератора поступает в Н-плечо моста T_1 и делится поровну и в фазе между его плечами 1 и 2. Сигнал идет по волноводам к разрядникам P_1 и P_2 , которые пробиваются и замыкают волноводы накоротко. После отражения от разрядников два равных по амплитуде, но противоположных по фазе сигнала поступают обратно в плечи 1 и 2 моста T_1 и выделяются в Е-плече на антенне. Противофазность сигналов получается за счет разности хода сигналов прямых от моста до разрядников и отраженных обратно к мосту $\psi = \frac{2\pi}{\Lambda} \left(\frac{\Lambda}{4} + \frac{\Lambda}{4} \right) = \pi$.

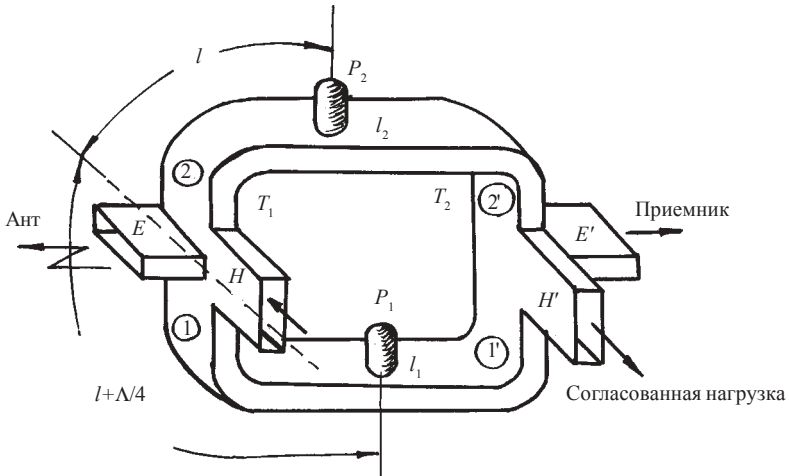


Рис. 7.13

Часть мощности сигнала, которая из-за неидеальности разрядников может через них просочиться, выделится на согласованной нагрузке моста T_2 , так как расстояние от мостов для сигналов в плечах $1'$ и $2'$ одинаковое, то они остались в фазе и поступят в H' -плечо моста T_2 .

В режиме приема разрядники не пробиваются, поскольку сигнал слабый. Поэтому сигнал, принятый антенной из E -плеча моста T_1 , в противофазе выходит из плеч 1 и 2 и в противофазе поступает в плечи моста T_2 , а далее выделяется в приемнике – плечо E' моста T_2 .

Библиографический список

1. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988.
3. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1994.
4. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высш. шк., 1990.