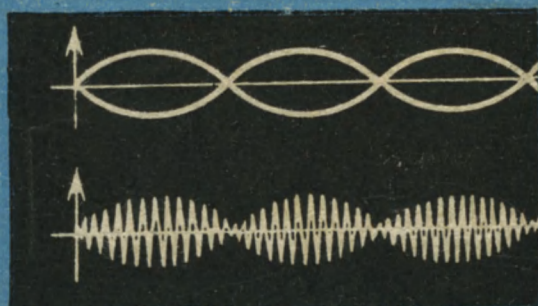


Г. Б. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ

ЗАДАЧИ И РАСЧЕТЫ ПО КУРСУ

„ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ И АНТЕННЫ“

МАШИНОСТРОЕНИЕ ~ 1966



Г. Б. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ

ЗАДАЧИ И РАСЧЕТЫ
ПО КУРСУ
„ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ
И АНТЕННЫ“

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для радиотехнических техникумов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
Москва 1966



В книге приведены задачи, контрольные вопросы и расчеты по основам теории колебательных цепей с сосредоточенными параметрами, длинных линий, электромагнитных волн, по распространению радиоволн и по антенно-фидерным устройствам. Расположение материала и последовательность задач соответствуют учебным пособиям автора «Антенны», Оборонгиз, 1962 и «Колебательные контуры и фильтры», изд. «Судостроение», 1965. В начале каждой главы приведены расчетные формулы, необходимые для решения задач. Значительная часть задач имеет решения, а на остальные даны ответы.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся техникумов по курсу «Основы радиотехники и антенны», а также может быть полезна студентам вузов и широкому кругу радиоспециалистов.

Рецензенты:

Московский радиомеханический техникум и канд. техн. наук **Н. Я. Семенов**

Редактор канд. техн. наук **Б. Я. Мякишев**

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Коэффициент амплитудной модуляции

$$m = \frac{\Delta U_m}{U_{m0}} = \frac{\Delta I_m}{I_{m0}},$$

где ΔU_m (или ΔI_m) — максимальное приращение амплитуды напряжения (тока) относительно амплитуды напряжения U_{m0} (тока I_{m0}) несущей частоты.

Мгновенное значение напряжения радиосигнала с несущей угловой частотой ω_0 и амплитудой U_{m0} , модулированного по амплитуде синусоидальным сигналом с угловой частотой Ω , выражается уравнением

$$u = U_{m0} \sin \omega_0 t + \frac{m U_{m0}}{2} \sin (\omega_0 + \Omega) t + \frac{m U_{m0}}{2} \sin (\omega_0 - \Omega) t. \quad (1.1)$$

Ширина спектра частот амплитудно-модулированного (АМ) радиосигнала

$$\Delta \omega_{\text{сп}} = 2\Omega_{\text{max}}, \quad (1.2)$$

где Ω_{max} — максимальная угловая частота спектра управляющего сигнала.

Индекс частотной модуляции (ЧМ)

$$M = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega}, \quad (1.3)$$

где $\Delta \omega_m$ — девиация угловой частоты;

Ω — угловая частота управляющего сигнала.

Мгновенное значение напряжения частотно-модулированного (ЧМ) радиосигнала

$$u = U_m [J_0(M) \sin \omega_0 t + J_1(M) \sin (\omega_0 + \Omega) t - J_1(M) \sin (\omega_0 - \Omega) t + J_2(M) \sin (\omega_0 + 2\Omega) t + J_2(M) \sin (\omega_0 - 2\Omega) t + J_3(M) \sin (\omega_0 + 3\Omega) t - J_3(M) \sin (\omega_0 - 3\Omega) t + \dots], \quad (1.4)$$

где U_m — амплитуда напряжения результирующего радиосигнала;
 ω_0 — несущая угловая частота;

Ω — угловая частота управляющего сигнала;
 $J_0(M)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;
 $J_1(M)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка;
 $J_2(M)$ — функция Бесселя первого рода второго порядка и т. д.

Ширина спектра частотно-модулированного радиосигнала при $M \gg 1$

$$\Delta\omega_{\text{сп}} \approx 2M\Omega = 2\Delta\omega_{\text{max}}. \quad (1.5)$$

ЗАДАЧИ¹

1.1.* Определить число станций N , которые одновременно могут работать в диапазонах частот $\Delta f = 100 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц}$, $1 \div 10 \text{ МГц}$ и $10 \div 100 \text{ МГц}$, если в станциях используется амплитудная модуляция при максимальной частоте управляющего сигнала $F_{\text{max}} = 5 \text{ кГц}$.

1.2. Какова максимально возможная частота управляющего сигнала одной из тридцати идентичных станций, работающих при амплитудной модуляции в диапазоне частот $\Delta f = 100 \div 1000 \text{ кГц}$?

1.3. Написать уравнение амплитудно-модулированного тока, если несущая частота тока $f_0 = 1 \text{ МГц}$, частота управляющего сигнала $F = 1 \text{ кГц}$, максимальное приращение амплитуды тока $\Delta I_m = 50 \text{ ма}$ и амплитуда тока несущей частоты $I_{m0} = 100 \text{ ма}$.

1.4. Изобразить в масштабе временные диаграммы АМ напряжения $U_{m0} = 1 \text{ в}$ для четырех случаев: а) частота управляющего сигнала $F = 2 \text{ кГц}$, коэффициент модуляции $m = 0,5$; б) $F = 4 \text{ кГц}$, $m = 0,5$; в) $F = 2 \text{ кГц}$, $m = 1$; г) $F = 4 \text{ кГц}$, $m = 1$.

1.5.* Написать уравнение ЧМ напряжения, если амплитуда радиосигнала $U_m = 100 \text{ в}$, девиация частоты $\Delta f_m = 30 \text{ кГц}$, несущая частота $f_0 = 50 \text{ МГц}$ и частота управляющего сигнала $F = 10 \text{ кГц}$.

1.6.* Определить индекс частотной модуляции и число радиостанций N , работающих без перекрытия спектров по частоте в диапазонах $\Delta f = 100 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц}$, $1 \div 10 \text{ МГц}$, $10 \div 100 \text{ МГц}$, если девиация частоты $\Delta f_m = 100 \text{ кГц}$ и максимальная частота управляющего сигнала $F = 5 \text{ кГц}$.

1.7. Определить девиацию частоты Δf_m и индекс частотной модуляции M , если ширина спектра ЧМ сигнала $\Delta f_{\text{сп}} = 60 \text{ кГц}$, а частота гармонического управляющего сигнала $F = 5 \text{ кГц}$.

1.8.* Как отразится на ширине спектра радиосигнала, модулированного по амплитуде и частоте, уменьшение частоты гармонического управляющего сигнала в два раза и увеличение амплитуды его в четыре раза, если коэффициент амплитудной модуляции не превышает единицы, а индекс частотной модуляции значительно больше единицы?

1.9. Написать уравнение мгновенного значения ЧМ напряжения, имеющего несущую частоту $f_0 = 60 \text{ МГц}$, амплитуду $U_m = 50 \text{ в}$,

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

девиацию частоты $\Delta f_m = 60$ кГц и частоту управляющего сигнала $F = 15$ кГц.

1. 10. Определить ширину спектра и индекс модуляции ЧМ сигнала, если известно, что девиация частоты $\Delta f_m = 80$ кГц, а частота гармонического управляющего сигнала $F = 4$ кГц.

Глава II

СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ОДИНОЧНОМ КОНТУРЕ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Индуктивность однослойной катушки (рис. 1, а)

$$L = \frac{0,001 \omega^2 D}{\frac{l}{D} + 0,44} \text{ мкГн}, \quad (2.1)$$

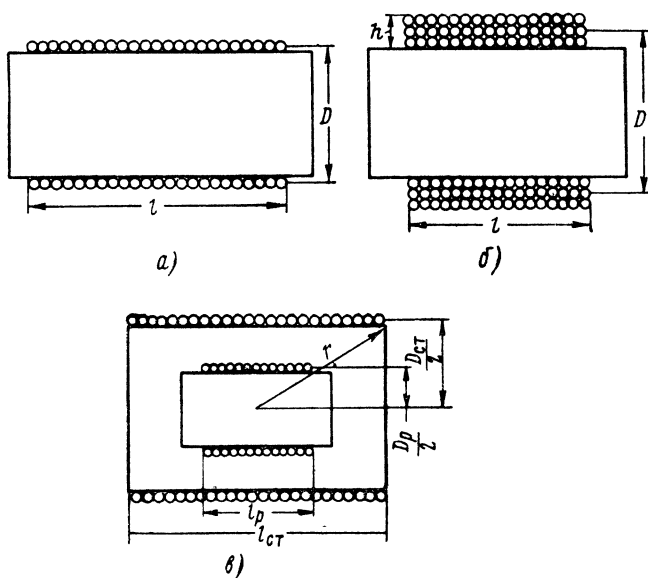


Рис. 1.

где l — длина намотки в мм;

D — средний диаметр намотки в мм;

ω — число витков.

Индуктивность многослойной катушки (рис. 1, б)

$$L = \frac{0,008 \omega^2 D^2}{3D + 9l + 10h} \text{ мкгн}, \quad (2.2)$$

где D — средний диаметр намотки в мм;

l — длина намотки в мм;

h — высота намотки в мм;

ω — число витков.

Индуктивность вариометра, состоящего из соединенных последовательно катушек статора и ротора (рис. 1, в), находится в пределах от

$$\left. \begin{aligned} L_{\min} &= L_{\text{ст}} + L_{\text{р}} - 2M_{\max} \\ L_{\max} &= L_{\text{ст}} + L_{\text{р}} + 2M_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

причем максимальная взаимоиндуктивность

$$M_{\max} = 1,974 \frac{(D_{\text{р}}/2)^2 \omega_{\text{ст}} \omega_{\text{р}}}{r} \cdot 10^{-3} \text{ мкгн}, \quad (2.4)$$

где $\omega_{\text{ст}}$, $\omega_{\text{р}}$ — числа витков обмоток статора и ротора; размеры $D_{\text{р}}$ и r в мм (рис. 1, в).

Добротность катушки индуктивности

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L}, \quad (2.5)$$

где r_L — сопротивление потерь в катушке.

Емкость плоского конденсатора, состоящего из N пластин площадью S (мм²) каждая, которые разделены изолятором толщиной a (мм) с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , будет

$$C = \frac{0,009 \epsilon S (N - 1)}{a} \text{ нф}. \quad (2.6)$$

Добротность конденсатора

$$Q_C = \frac{1}{\text{tg } \delta_C} = R_C \omega C = \frac{1}{\omega C r_C}, \quad (2.7)$$

где R_C , r_C — эквивалентное сопротивление потерь в конденсаторе, рассчитанное исходя соответственно из параллельного и последовательного включения этого сопротивления относительно емкости; δ_C — угол потерь в конденсаторе.

Параллельное соединение реактивного X и активного R сопротивления эквивалентно последовательному соединению реактивного x и активного r сопротивлений (рис. 2), если

$$x = X; \quad (2.8)$$

$$r = \frac{X^2}{R} = \frac{x^2}{R}. \quad (2.9)$$

Эти равенства справедливы при $r \ll x$ или $R \gg X$. Частота колебаний f связана с длиной волны λ (м) зависимостью

$$f = \frac{300}{\lambda} \text{ МГц.} \quad (2.10)$$

Собственная длина волны контура

$$\lambda_0 = 1,88 \sqrt{LC} \text{ м,} \quad (2.11)$$

где L в мкГн и C в пФ — индуктивность и емкость контура.

Собственная частота контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (2.12)$$

Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \text{ Ом,} \quad (2.13)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ — собственная угловая частота контура.

Индуктивное и емкостное сопротивления контура соответственно будут

$$x_L = \frac{1880L}{\lambda_0} \text{ Ом;} \quad (2.14)$$

$$x_C = \frac{530\lambda_0}{C} \text{ Ом,} \quad (2.15)$$

где L в мкГн; C в пФ и λ_0 в м.

При свободных колебаниях в контуре начальные амплитуды напряжения U_{m0} и тока I_{m0} связаны зависимостью

$$I_{m0} = \frac{U_{m0}}{\varrho}. \quad (2.16)$$

Постоянная времени контура

$$\tau_k = \frac{2L}{r}, \quad (2.17)$$

где r — сопротивление потерь во всем контуре.

Логарифмический декремент затухания, затухание и добротность контура соответственно будут

$$\vartheta = \frac{\pi r}{\varrho}; \quad d = \frac{\vartheta}{\pi} = \frac{r}{\varrho}; \quad Q = \frac{1}{d} = \frac{\varrho}{r}. \quad (2.18)$$

Критическое затухание контура наблюдается при $r = 2\varrho$.

Длительность переходного процесса в контуре

$$t \approx (3 \div 5) \tau_k = \frac{(6 \div 10)L}{r}. \quad (2.19)$$

Комплексное входное сопротивление цепи

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}},$$

где $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ — активная и реактивная составляющие входного сопротивления.

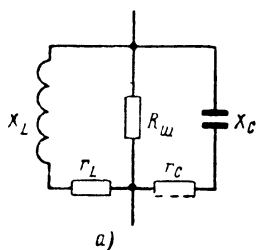


Рис. 2.

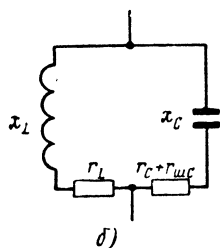


Рис. 3.

Модуль полного входного сопротивления последовательного контура (рис. 3).

$$z_{\text{вх}} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (2.20)$$

а аргумент этого сопротивления

$$\varphi_{\text{вх}} = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}. \quad (2.21)$$

При резонансе в последовательном контуре ($X_{\text{вх}} = x = 0$) амплитудные значения э. д. с. генератора $\mathcal{E}_{m1}$, тока генератора I_{m1} , контурного тока I_{mk} связаны зависимостью

$$I_{mk} = I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{r}, \quad (2.22)$$

а амплитуды напряжения на индуктивности U_{mL} и емкости U_{mC} контура связаны следующей зависимостью:

$$U_{mL} = U_{mC} = \mathcal{E}_{m1} Q. \quad (2.23)$$

Модуль коэффициента передачи напряжения последовательного контура K при обобщенной расстройке $a = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$, соответствующей абсолютной расстройке $\Delta f \ll f_0$, равен

$$K = \frac{Q}{\sqrt{1 + a^2}} = \frac{Q}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}}. \quad (2.24)$$

Полоса пропускания контура на уровне $K=0,707Q$ равна

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{f_0}{Q}. \quad (2.25)$$

Амплитуда напряжения генератора, питающего параллельный контур любого вида (рис. 4),

$$U_{m1} = \mathcal{E}_{m1} - I_{m1} R_{\text{в}}, \quad (2.26)$$

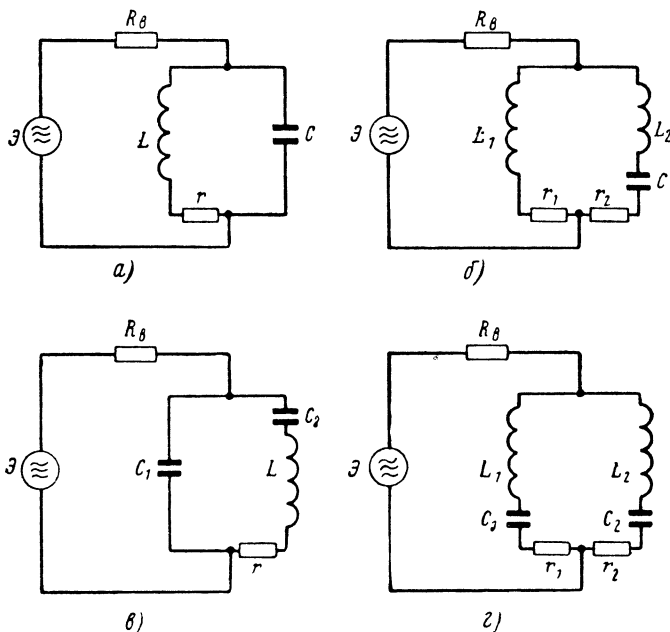


Рис. 4.

где $\mathcal{E}_{m1}$ и $R_{\text{в}}$ — амплитуда э. д. с. и внутреннее сопротивление генератора;

I_{m1} — амплитуда тока генератора.

При резонансе в параллельном контуре I вида (рис. 4, а) входное сопротивление

$$R_{\text{вх I}} = \frac{L}{Cr} = \frac{Q^2}{r} = Q = \frac{\omega_0^2 L^2}{r} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 r}, \quad (2.27)$$

а амплитуда тока в контуре при резонансе

$$I_{m \text{ к}} = I_{m1} Q.$$

При резонансе в параллельном контуре II вида (рис. 4, б) входное сопротивление

$$R_{\text{вх II}} = p_L^2 R_{\text{вх I}}, \quad (2.28)$$

а амплитуда контурного тока

$$I_{mк} = p_L I_{m1} Q, \quad (2.29)$$

где $p_L = \frac{L_1}{L}$ — коэффициент включения контура, а $L = L_1 + L_2$.

При резонансе в параллельном контуре III вида (рис. 4, в) входное сопротивление

$$R_{вх III} = p_C^2 R_{вх I}, \quad (2.30)$$

а амплитуда контурного тока

$$I_{mк} = p_C I_{m1} Q, \quad (2.31)$$

где $p_C = \frac{C}{C_1} = \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2) C_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$ — коэффициент включения контура.

При резонансе в параллельном контуре общего вида (рис. 4, г) входное сопротивление (при $r_1 \ll x_1$; $r_2 \ll x_2$)

$$R_{вх} = \frac{x_1^2}{r} = \frac{x_2^2}{r}, \quad (2.32)$$

где x_1 , x_2 — реактивное сопротивление одной ветви контура;
 r — активное сопротивление контура при последовательном обходе его элементов.

Амплитуда контурного тока в контуре общего вида при резонансе

$$I_{mк} = I_{m1} \frac{|x_1|}{r} = I_{m1} \frac{|x_2|}{r}. \quad (2.33)$$

Эквивалентная добротность параллельного контура

$$Q_э = \frac{Q}{1 + \frac{R_{вх}}{R_в}}, \quad (2.34)$$

где Q — добротность контура, вычисленная без учета шунтирования его внутренним сопротивлением генератора;
 $R_{вх} = Q Q$ — входное сопротивление контура при том же условии.

Модуль коэффициента передачи напряжения параллельного контура при обобщенной расстройке $a_э = Q_э \frac{2\Delta f}{f_0}$ равен

$$K = \frac{K_0}{\sqrt{1 + a_э^2}}, \quad (2.35)$$

где $K_0 = Q Q_э / R_в$ — резонансный коэффициент передачи напряжения контура.

Полоса пропускания параллельного контура

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{f_0}{Q_s} = \frac{f_0}{Q} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_b} \right). \quad (2.36)$$

ЗАДАЧИ¹

2.1. В чем различие между напряжением на индуктивности и э. д. с. самоиндукции, какова их полярность и как они взаимодействуют?

2.2. Почему индуктивное и емкостное сопротивления называются реактивными? Чем они отличаются от активного сопротивления?

2.3. Показать, пользуясь схемой, что падение напряжения на емкости и э. д. с. емкости противодействуют друг другу.

2.4. В чем физическая сущность емкостного сопротивления? Как объяснить влияние емкости и частоты тока на емкостное сопротивление? Почему в цепи с последовательно включенной емкостью постоянный ток невозможен, а переменный — возможен?

2.5. Мгновенное значение напряжения генератора, питающего индуктивность L , выражается уравнением $u_1 = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$. Написать уравнения мгновенных значений напряжения на индуктивности u_L , э. д. с. самоиндукции e_L и тока в цепи i . Как все эти величины записываются в комплексном виде?

2.6. Решить предыдущую задачу при конкретных данных: $U_m = 80$ в, $f = 10$ МГц, $\varphi_0 = 30^\circ$ и $L = 60$ мкГн.

2.7. Как изменится индуктивное сопротивление катушки, если по всей длине ее ввести сердечник с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 10$ и, кроме того, уменьшить частоту тока в два раза?

2.8.* Определить размеры и добротность однослойной катушки, имеющей длину намотки $l = 1,5D$, индуктивность $L = 60$ мкГн, число витков $w = 30$ и сопротивление активных потерь при частоте $f = 5$ МГц, равное $r_L = 10$ ом.

2.9.* Определить число витков многослойной катушки, намотка которой имеет внутренний диаметр $D_1 = 20$ мм, наружный диаметр $D_2 = 40$ мм, длину l , равную среднему радиусу, и индуктивность $L = 200$ мкГн.

2.10. Какой должна быть максимальная взаимная индуктивность между статорной и роторной катушками вариометра, если его минимальная индуктивность $L_{\text{min}} = 60$ мкГн, а максимальная $L_{\text{max}} = 100$ мкГн?

2.11.* В вариометре $D_p = l_p = 30$ мм, $D_{\text{ст}} = l_{\text{ст}} = 66$ мм, число витков статорной обмотки $w_{\text{ст}} = 35$, число витков роторной обмотки $w_p = 15$. Определить пределы изменения индуктивности вариометра.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

2.12. Как влияет на емкостное сопротивление конденсатора, увеличение частоты тока в три раза и диэлектрической проницаемости в четыре раза?

2.13.* Определить число пластин N и объем воздушного конденсатора V_K емкостью $C=1000$ пф при толщине металлических пластин $b=0,4$ мм и площади каждой из них $S=250$ мм² и воздушных промежутках $a=0,8$ мм.

2.14. Как изменятся величины N и V_K конденсатора, рассмотренного в задаче 2.13 ($S=250$ мм², $C=1000$ пф), если обкладками в нем будут листы фольги толщиной $b=0,03$ мм, а диэлектриком — листы слюды ($\epsilon=7$) толщиной $a=0,1$ мм?

2.15.* Колебательный контур, имеющий при частоте $f=1$ Мгц равные реактивные сопротивления $|X_L|=|X_C|=500$ ом и активные сопротивления $r_L=3$ ом и $r_C=0,5$ ом, шунтируется согласно схеме на рис. 2, а активным сопротивлением $R_{ш}=5 \cdot 10^4$ ом. Определить параметры эквивалентного контура, изображенного на рис. 2, б.

2.16. Контур, включенный по схеме (см. рис. 2, а), имеет при частоте $f_0=5$ Мгц равные реактивные сопротивления $|X_L|=|X_C|=600$ ом и активные сопротивления потерь $r_L=2,5$ ом, $r_C=0,5$ ом. Какие параметры имеет эквивалентный контур, изображенный на рис. 2, б, при шунтирующем сопротивлении $R_{ш}=10^5$ ом?

2.17. Определить тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_C$ и добротность Q_C конденсатора емкостью $C=1000$ пф, который при частоте тока $f=300$ кГц обладает сопротивлением потерь $r_C=0,1$ ом. Как изменятся эквивалентные значения $\operatorname{tg} \delta_C$ и Q_C , если конденсатор шунтировать активным сопротивлением $R_{ш}=5$ ком?

2.18. Можно ли выразить характеристическое сопротивление контура формулами

$$\varrho(\text{ом}) = \frac{1880L(\text{мкгн})}{\lambda_0(\text{м})} \text{ и } \varrho(\text{ом}) = \frac{530\lambda_0(\text{м})}{C(\text{пф})} ?$$

2.19. Что называется постоянной времени колебательного контура? Почему с увеличением индуктивности и уменьшением активного сопротивления контура постоянная времени этого контура возрастает?

2.20.* Контур без потерь имеет индуктивность $L=35$ мкгн и собственную длину волны $\lambda_0=100$ м. Требуется определить собственную частоту, емкость и характеристическое сопротивление контура, а также амплитуду тока в контуре при амплитуде напряжения $U_m=25$ в.

2.21. В контуре без потерь, индуктивность которого 30 мкгн и емкость 100 пф, происходят свободные колебания. Определить период, частоту и длину волны колебаний, а также характеристическое сопротивление контура.

2.22. Частота свободных колебаний, происходящих в контуре без потерь, равна 5 Мгц. Определить индуктивность, характеристики.

ческое сопротивление, период и длину волны колебаний, если емкость контура 60 нф .

2.23.* Свободные колебания в контуре без потерь имеют амплитуду напряжения 60 в , амплитуду тока 60 ма и частоту $0,5 \text{ Мгц}$. Определить параметры контура L , C и собственную длину волны λ_0 .

2.24. Свободные колебания, происходящие в контуре без потерь, имеют амплитуду напряжения 20 в , амплитуду тока 40 ма и длину волны 100 м . Определить индуктивность и емкость контура, а также период и частоту колебаний.

2.25.* В контуре, содержащем индуктивность 100 мкгн , активное сопротивление 5 ом и неизвестную емкость C , происходят свободные колебания с начальной амплитудой тока 100 ма и частотой 1500 кгц . Определить емкость, собственную длину волны, начальную амплитуду напряжения, постоянную времени цепи, логарифмический декремент, затухание и добротность контура.

2.26. В контуре, емкость которого 100 нф и активное сопротивление 6 ом , происходят свободные колебания с начальной амплитудой тока 50 ма и частотой 6 Мгц . Определить индуктивность контура, период и длину волны колебаний, а также начальную амплитуду напряжения на элементах контура.

2.27.* В контуре, имеющем добротность 100 , происходят свободные колебания с длиной волны 80 м , начальными амплитудами напряжения 80 в и тока 100 ма . Определить параметры контура L , C , r , q и коэффициенты τ_k , Φ , d .

2.28. Индуктивность контура 20 мкгн , добротность 100 и собственная длина волны 40 м . Определить емкость, активное сопротивление, собственную частоту, логарифмический декремент затухания, постоянную времени цепи и затухание контура.

2.29. Свободные колебания в контуре имеют начальную амплитуду напряжения 40 в , начальную амплитуду тока 70 ма и период 1 мксек . Определить индуктивность и емкость контура, а также активное сопротивление, добротность, логарифмический декремент затухания и постоянную времени цепи при затухании контура $0,08$.

2.30.* Определить характер разряда конденсатора в контуре, емкость которого 100 нф , активное сопротивление 4 ом и собственная частота 4 Мгц . При каком значении сопротивления потерь затухание контура становится критическим?

2.31. Проверить возможность колебательного разряда в контуре, имеющем емкость 300 нф , собственную длину волны 250 м и активное сопротивление 20 ом . При каком значении активного сопротивления контура наступает критическое затухание?

2.32. Какой колебательный контур называется последовательным? В чем неточность определения: последовательным контуром называется последовательное соединение индуктивности и емкости между собой?

2.33. Генератор с неизменной частотой 1000 кгц питает контур, в котором при различных параметрах L и C были зафиксированы

три значения собственной частоты: 950, 1000 и 1050 *кГц*. Какую частоту будут иметь установившиеся в контуре колебания в каждом из этих случаев?

2. 34.* Определить длительность переходного процесса в последовательном контуре, имеющем собственную частоту $f_0=3$ *МГц*, емкость $C=100$ *пФ* и добротность $Q=100$.

2. 35. Индуктивность колебательного контура 80 *мкГн*, собственная длина волны 240 *м* и затухание 0,01. Определить длительность переходного процесса (установления колебаний) в контуре.

2. 36.* В колебательный контур с логарифмическим декрементом затухания 0,04¹, собственной длиной волны 980 *м* и индуктивностью 400 *мкГн* последовательно включен генератор, э. д. с. которого имеет длину волны 1000 *м* и амплитуду 0,5 *в*. Требуется определить амплитуду и характер тока в контуре.

2. 37. В чем физический смысл аргумента входного сопротивления контура и аргумента комплексной амплитуды контурного тока?

2. 38. Колебательный контур с добротностью 60, собственной длиной волны 25 *м* и емкостью 30 *пФ* питается от последовательно включенного генератора, э. д. с. которого имеет амплитуду 100 *мв* и частоту 12 *МГц*. Определить амплитуду и характер тока в контуре.

2. 39. Последовательный контур, имеющий индуктивность 50 *мкГн*, активное сопротивление 10 *ом* и собственную частоту 3 *МГц*, питается током генератора, амплитуда которого 250 *ма* и частота 3,03 *МГц*. Определить амплитуды э. д. с. генератора и напряжений на элементах контура, а также сдвиг по фазе между током и э. д. с. генератора.

2. 40. В чем физический смысл резонанса напряжений? Почему с увеличением добротности контура увеличивается усиление контура, получаемое при резонансе? Происходит ли усиление мощности при резонансе в последовательном контуре?

2. 41.* Амплитуда выходного напряжения, снимаемого с емкости последовательного контура, равна 60 *в*, а амплитуда э. д. с. генератора равна 0,4 *в*. Контур настроен в резонанс с частотой генератора 500 *кГц* и имеет активное сопротивление 4 *ом*. Определить индуктивность и емкость контура, амплитуду тока в нем и напряжения на всех его элементах.

2. 42. При резонансе в последовательном контуре, имеющем собственную частоту 6 *МГц* и емкость 25 *пФ*, амплитуда выходного напряжения равна 400 *в*, когда амплитуда э. д. с. генератора равна 6 *в*. Определить индуктивность и активное сопротивление контура, а также амплитуды тока в контуре и напряжений на всех его элементах.

¹ Здесь и в дальнейшем внутреннее сопротивление генератора предполагается активным и входящим в активное сопротивление последовательного контура. Поэтому во всех коэффициентах затухания контура учтены потери на внутреннем сопротивлении генератора.

2. 43. При резонансе в последовательном контуре ток с амплитудой 100 *ма* вызывает на выходе напряжение с амплитудой 50 *в*. Генератор, питающий контур, имеет э. д. с. с амплитудой 0,4 *в* и частотой 15 *Мгц*. Определить индуктивность, емкость, активное сопротивление, логарифмический декремент и затухание контура.

2. 44. Изобразить графически зависимости модуля и аргумента входного сопротивления последовательного контура от его расстройки Δf в пределах (0—0,05) от резонансной частоты f_0 , равной 25 *Мгц*, если активное сопротивление контура 4 *ом*, а индуктивность 2,5 *мкгн*.

2. 45.* Определить модуль коэффициента передачи напряжения последовательного контура при расстройке $\Delta f = 0; 2; 5; 12$ *кгц*, если контур имеет емкость 200 *пф*, активное сопротивление 8 *ом* и полосу пропускания $\Delta f_{\text{пр}} = 10$ *кгц*.

2. 46. Построить амплитудно-частотные характеристики контура в относительном масштабе $\frac{K}{K_0} = \varphi\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)$ при относительной расстройке $\frac{\Delta f}{f_0} = 0 \div 0,05$ для трех значений добротности контура $Q = 50, 100, 200$.

2. 47. Каков резонансный коэффициент передачи напряжения последовательного контура, если его резонансная частота 230 *кгц*, емкость 1000 *пф* и активное сопротивление 9 *ом*?

2. 48. Построить графики зависимости амплитуды тока от частоты для последовательного контура, имеющего емкость 25 *пф*, добротность 90 и резонансную длину волны 150 *м*, если контур питается от источника э. д. с. с амплитудой 200 *мв*.

2. 49. Дать определение параллельного контура. При каких значениях (больших или малых) внутреннего сопротивления источника э. д. с. целесообразно применять параллельный колебательный контур и при каких последовательный?

2. 50. Какими формулами выражаются резонансные сопротивления параллельного контура для токов генератора и контура? Можно ли утверждать, что входное сопротивление параллельного контура является полным сопротивлением для контурного тока? Справедливо ли это определение для последовательного контура?

2. 51. Чем объяснить влияние величины добротности параллельного контура на усиление тока при резонансе?

2. 52.* Контур I вида (рис. 4, *а*), имеющий емкость 200 *пф* и сопротивление потерь 7 *ом*, питается генератором, амплитуда э. д. с. которого 300 *в* и внутреннее сопротивление 40 *ком*. При резонансе амплитуда напряжения на контуре равна 120 *в*. Определить индуктивность и добротность контура, токи генератора и контура.

2. 53. Контур I вида настроен в резонанс на частоту 5 *Мгц*. Индуктивность контура 23 *мкгн*, сопротивление потерь в контуре 6 *ом*, амплитуда напряжения на контуре 100 *в*, внутреннее сопротивление

генератора 120 *ком*. Определить емкость контура, амплитуды э. д. с., тока генератора, тока в контуре.

2. 54. Контур I вида при частоте $f=30$ Мгц имеет резонансное входное сопротивление 20 *ком*, амплитуда тока в контуре 1,5 *а*, амплитуда тока генератора 18 *ма*. Определить элементы контура L , C , r , амплитуды напряжения на контуре и э. д. с. генератора при $R_{\text{в}}=40$ *ком*.

2. 55. Как следует распределить индуктивность по ветвям контура II вида и емкость по ветвям контура III вида, чтобы при исходных данных L , C , r предыдущей задачи получить резонансное входное сопротивление контура 12 *ком*? Какое при этом установится соотношение между током контура и генератора при резонансе?

2. 56. Какое значение (максимальное или минимальное) при резонансе в параллельном контуре имеет его входное сопротивление, сопротивление для контурного тока, ток генератора, ток в ветвях контура и напряжение на контуре?

2. 57. Определить амплитуды э. д. с. и тока генератора, питающего контур II вида (рис. 4, б) с параметрами $L_1=10$ мкгн, $C=250$ пф, $r_1=2,5$ ом, $L_2=20$ мкгн, $r_2=3,5$ ом, если известно, что внутреннее сопротивление генератора 20 *ком*, а амплитуда тока в контуре 1 *а*.

2. 58. Контур II вида (рис. 4, б) имеет резонансное входное сопротивление 25 *ком* при резонансной частоте 1 Мгц, емкости 250 пф и коэффициенте затухания 0,008. Определить индуктивности ветвей и сопротивление потерь контура.

2. 59. Контур III вида (рис. 4, в) при резонансной длине волны 60 м, индуктивности контура 200 мкгн и добротности контура 120 имеет входное сопротивление 40 *ком*. Определить емкости ветвей и сопротивление потерь контура.

2. 60.* Параллельный контур общего вида (рис. 4, г) содержит в левой ветви индуктивность $L_1=5$ мкгн, емкость $C_1=70$ пф и активное сопротивление $r_1=3,5$ ом, а в правой ветви — индуктивность $L_2=4$ мкгн, емкость $C_2=55$ пф и активное сопротивление $r_2=2,5$ ом. Определить частоту параллельного резонанса, добротность и резонансное входное сопротивление контура.

2. 61.* Определить ток питающей цепи и ток в контуре, данные которого приведены в предыдущей задаче, если контур питается источником э. д. с. с амплитудой 200 в и внутренним сопротивлением 10 *ком*.

2. 62. Параллельный контур общего вида (рис. 4, г) содержит в одной ветви индуктивность $L_1=15$ мкгн, емкость $C_1=250$ пф и активное сопротивление $r_1=2,5$ ом, а в правой ветви — индуктивность $L_2=10$ мкгн, емкость $C_2=200$ пф и активное сопротивление $r_2=1,5$ ом. Определить резонансную длину волны, логарифмический декремент и резонансное входное сопротивление контура.

2. 63. Параллельный контур общего вида (рис. 4, г) имеет резонансную длину волны 40 м при параметрах: $L_1=9$ мкгн,

$C_1=90$ пф, $r_1=2$ ом и $L_2=7$ мкгн. Определить емкость C_2 , активное сопротивление r_2 и резонансное входное сопротивление $R_{вх}$, если известно, что добротность контура $Q=90$.

2. 64.* Имеется параллельный контур общего вида (рис. 4, з), в одной ветви которого включены индуктивность $L_1=50$ мкгн, емкость $C_1=500$ пф и активное сопротивление $r_1=3$ ом, а в другой ветви — индуктивность $L_2=60$ мкгн, емкость $C_2=600$ пф и активное сопротивление $r_2=3,5$ ом. Определить входное сопротивление данного контура. Как изменится это сопротивление, если элементы C , L , r включить по схеме контура I вида? Как следует распределить индуктивность L и емкость C по ветвям контуров II и III видов, чтобы входное сопротивление уменьшилось в два раза?

2. 65.* Контур I вида, имеющий индуктивность $L=40$ мкгн, емкость $C=100$ пф и сопротивление потерь $r=7$ ом, питается генератором с внутренним сопротивлением $R_{в}=200$ ком. Определить модуль коэффициента передачи напряжения контура при резонансе и при относительной расстройке контура $\Delta f/f_0=0,02$.

2. 66.* Определить полосу пропускания контура, данные которого приведены в предыдущей задаче. Определить, каким активным сопротивлением нужно шунтировать контур, чтобы увеличить полосу пропускания в три раза.

2. 67. Построить графики зависимостей активной и реактивной составляющих, модуля и аргумента входного сопротивления контура I вида от расстройки контура Δf . Индуктивность контура 30 мкгн, емкость 300 пф и сопротивление потерь 3,5 ом.

2. 68. Построить амплитудно-частотную характеристику контура, данные которого приведены в предыдущей задаче, при $R_{в}=60$ ком.

2. 69. Полоса пропускания контура I вида равна 30 кГц при резонансной длине волны 200 м, внутреннем сопротивлении генератора 250 ком и индуктивности контура 45 мкгн. Определить емкость и сопротивление активных потерь в контуре.

2. 70. Каким активным сопротивлением следует шунтировать контур I вида, чтобы увеличить его полосу пропускания до 40 кГц? Параметры контура приведены в предыдущей задаче.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СВЯЗАННЫХ КОНТУРАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Коэффициент связи в схеме с индуктивной (трансформаторной) связью контуров (рис. 5, а)

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_I L_{II}}}, \quad (3.1)$$

где M — взаимоиндуктивность между контурами;

L_I, L_{II} — общая индуктивность соответственно первичного и вторичного контуров.

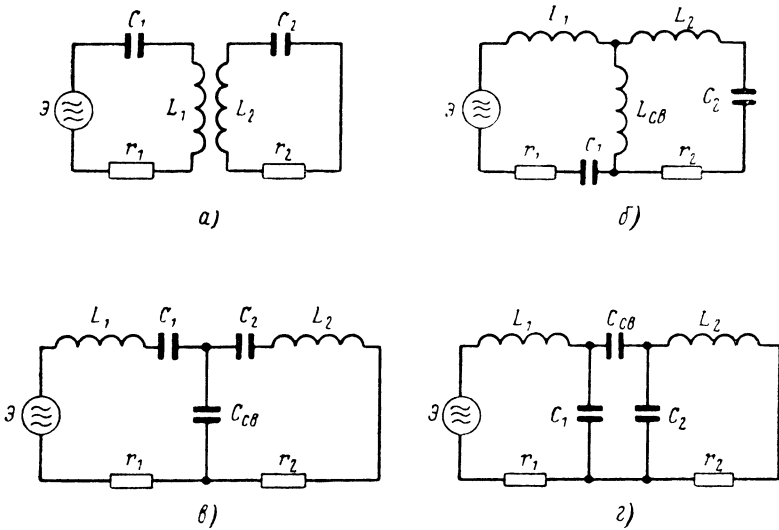


Рис. 5.

Коэффициент связи между контурами с автотрансформаторной связью (рис. 5, б)

$$k = \frac{L_{св}}{\sqrt{L_I L_{II}}}, \quad (3.2)$$

где $L_{св}$ — индуктивность катушки связи;

L_I, L_{II} — общая индуктивность соответственно первичного и вторичного контуров.

Коэффициент связи в схеме с внутренней емкостной связью (рис. 5, в)

$$k = \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{C_{св}}, \quad (3.3)$$

где $C_{св}$ — емкость конденсатора связи;

C_1, C_2 — общая емкость соответственно первичного и вторичного контуров.

Коэффициент связи для схемы (рис. 5, г)

$$k = \frac{C_{св}}{\sqrt{(C_{св} + C_1)(C_{св} + C_2)}} \approx \frac{C_{св}}{\sqrt{C_1 C_2}}. \quad (3.4)$$

Активная $R_{вх}$ и реактивная $X_{вх}$ составляющие входного сопротивления связанных контуров будут

$$R_{вх} = r_1 + r_{вн}; \quad X_{вх} = x_1 + x_{вн}, \quad (3.5)$$

причем активная и реактивная составляющие сопротивления, вносимого из вторичного контура в первичный, соответственно равны

$$r_{вн} = \frac{x_{св}^2}{z_2^2} r_2; \quad x_{вн} = -\frac{x_{св}^2}{z_2^2} x_2, \quad (3.6)$$

где $x_{св}$ — реактивное сопротивление связи;

$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$ — модуль полного сопротивления вторичного контура.

Условие первого частного резонанса

$$X_{вх} = x_1 + x_{вн} = 0, \quad (3.7)$$

а второго частного резонанса

$$x_2 + x'_{вн} = 0, \quad (3.8)$$

где $x'_{вн} = -\frac{x_{св}^2}{z_1^2} x_1$ — реактивное сопротивление, вносимое из первичного контура во вторичный.

Полный резонанс наблюдается при частоте генератора ω , равной собственной частоте обоих контуров ω_0 , и критической связи с коэффициентом

$$k = k_{кр} = \sqrt{d_1 d_2}, \quad (3.9)$$

где d_1, d_2 — затухание соответственно первичного и вторичного контуров.

При этом сопротивление связи

$$x_{св} = \sqrt{r_1 r_2}. \quad (3.10)$$

Амплитуда тока в первичном и вторичном контурах при полном резонансе

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2r_1}; \quad I_{m2} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2\sqrt{r_1 r_2}}. \quad (3.11)$$

При сложном резонансе:
сопротивление связи

$$x_{св} = z_2 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}, \quad (3.12)$$

а амплитуда тока во вторичном контуре

$$I_{m2} = I_{2mm} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2\sqrt{r_1 r_2}}. \quad (3.13)$$

При одинаковых контурах с собственной частотой f_0 сложный резонанс наступает при частоте генератора, равной либо «медленной» частоте связи f_I , либо «быстрой» частоте связи f_{II} :

$$f_I = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}}; \quad f_{II} = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}}. \quad (3.14)$$

Коэффициент полезного действия первичной цепи связанных контуров

$$\eta_{п,к} = \frac{r_{вн}}{r_1 + r_{вн}}. \quad (3.15)$$

Коэффициент передачи напряжения связанных контуров при полном и сложном резонансе одинаковый:

$$K = K_{mm} = \frac{Q}{2}. \quad (3.16)$$

Модуль резонансного коэффициента передачи напряжения идентичных связанных контуров при произвольной величине связи

$$K_0 = \frac{\eta}{1+\eta^2} Q, \quad (3.17)$$

где η — отношение действительного коэффициента связи k к критическому коэффициенту $k_{кр}$;

Q — добротность одного контура.

Модуль коэффициента передачи напряжения идентичных связанных контуров при обобщенной расстройке a

$$K = \frac{Q\eta}{\sqrt{(1+\eta^2)^2 + 2(1-\eta^2)a^2 + a^4}}. \quad (3.18)$$

В фильтрах нижних частот (рис. 6, а, б), согласованных с нагрузкой, частота среза, индуктивность и емкость соответственно равны

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}; \quad L = \frac{R_H}{\pi f_c}; \quad C = \frac{1}{\pi f_c R_H}, \quad (3.19)$$

где R_H — сопротивление нагрузки.

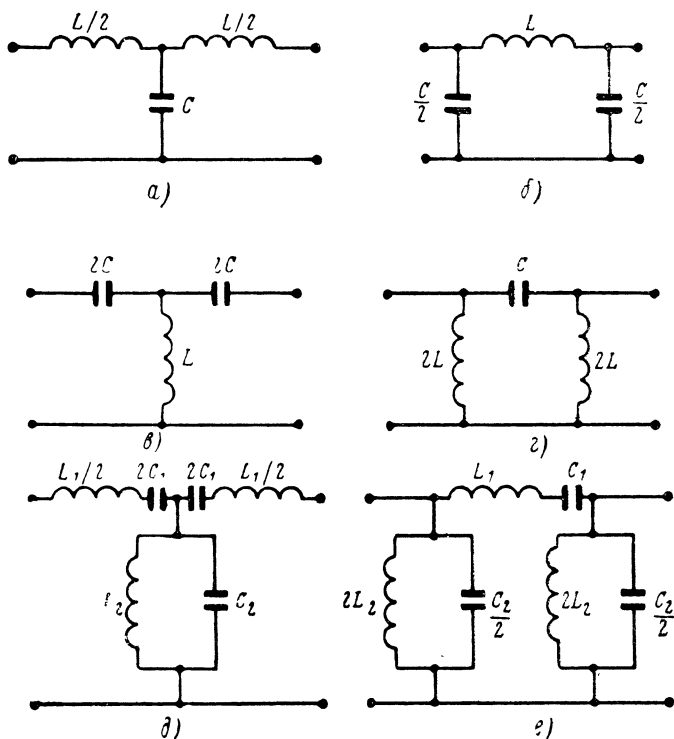


Рис. 6.

В фильтрах верхних частот (рис. 6, в, г), согласованных с нагрузкой, частота среза, индуктивность и емкость соответственно равны

$$f_c = \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}; \quad L = \frac{R_H}{4\pi f_c}; \quad C = \frac{1}{4\pi f_c R_H}. \quad (3.20)$$

Элементы полосового фильтра (рис. 6, д, е), согласованного с сопротивлением нагрузки R_H и имеющего полосу прозрачности $\omega_{C1} \div \omega_{C2}$, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{2R_H}{\omega_{C2} - \omega_{C1}}; & L_2 &= \frac{R_H(\omega_{C2} - \omega_{C1})}{2\omega_0^2}; \\ C_1 &= \frac{\omega_{C2} - \omega_{C1}}{2\omega_0^2 R_H}; & C_2 &= \frac{2}{(\omega_{C2} - \omega_{C1}) R_H}, \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

$$\omega_{C2} - \omega_{C1} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_1 C_2}},$$

где $\omega_0 = \sqrt{\omega_{C1}\omega_{C2}}$ — резонансная угловая частота контуров.

ЗАДАЧИ¹

3.1.* В схеме с внутренней емкостной связью коэффициент связи $k=0,1$, а емкости $C_1=C_2=50$ пф. Определить емкость связи.

3.2. Один из индуктивно связанных контуров имеет емкость 25 пф при собственной частоте 10 Мгц, а второй контур — емкость 30 пф при собственной частоте 9 Мгц. Какой должна быть взаимоиндуктивность между контурными катушками, чтобы получить коэффициент связи 0,1?

3.3. Коэффициент связи между контурами с внутриемкостной связью (рис. 5, в) равен 0,25, а емкости $C_1=C_2=30$ пф. Определить емкость конденсатора связи.

3.4. В схеме с автотрансформаторной связью (рис. 5, б) $L_1=10$ мкгн; $C_1=45$ пф, $L_2=8$ мкгн, а собственная длина волны первичного контура 50 м. Определить коэффициент связи между контурами.

3.5.* Индуктивно связанные контуры (рис. 5, а) имеют параметры: $L_1=11$ мкгн, $C_1=40$ пф, $r_1=4$ ом, $L_2=12$ мкгн, $C_2=36$ пф, $r_2=4,5$ ом, $k=0,2$. В первичный контур включен источник э. д. с. с амплитудой 5 в и длиной волны $\lambda=40$ м. Определить амплитуды токов в контурах и напряжение, которое снимается с емкости C_2 .

3.6.* В схеме с автотрансформаторной связью (рис. 5, б) общие индуктивности контуров $L_I=L_{II}=50$ мкгн, емкость $C_2=150$ пф, активные сопротивления $r_1=r_2=6$ ом и коэффициент связи $k=0,1$. Схема питается генератором синусоидальной э. д. с. с амплитудой $\mathcal{E}_{m1}=10$ в и длиной волны 150 м. Определить емкость первичного контура, амплитуду и фазу тока в этом контуре при первом частном резонансе.

3.7. В индуктивно связанных контурах установлен первый частный резонанс. Исходные данные: $L_1=4,3$ мкгн; $L_2=4,4$ мкгн; $C_2=25$ пф; $r_1=r_2=5$ ом; коэффициент связи 0,1; э. д. с. генератора имеет амплитуду $\mathcal{E}_{m1}=9,3$ в и частоту $f=15$ Мгц. Определить емкость C_1 , амплитуду и фазу тока в первичном контуре.

3.8. В схеме с автотрансформаторной связью $L_1=15$ мкгн; $L_2=20$ мкн; $L_{CB}=5$ мкгн; $C_1=45$ пф; $r_1=r_2=4$ ом и длина волны

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

генератора $\lambda=60$ м. Определить емкость C_2 при втором частном резонансе.

Примечание. Вносимые сопротивления из первичного контура во вторичный $r'_{\text{вн}} = \frac{x_{\text{св}}^2}{z_1^2} r_1$, $x'_{\text{вн}} = -\frac{x_{\text{св}}^2}{z_1^2} x_1$.

3. 9.* Два одинаковых контура с внутренней емкостной связью (рис. 5, в) настроены на полный резонанс при частоте 30 Мгц. Емкость каждого контура $C_1=C_2=35$ нф, а сопротивление потерь $r=4$ ом. Амплитуда э. д. с. генератора 5 в. Определить индуктивности контуров, емкость и коэффициент связи, амплитуды токов в контурах и выходного напряжения, а также коэффициент передачи напряжения.

3. 10. Два контура с автотрансформаторной связью имеют одинаковые параметры. Индуктивность $L_1=L_2=250$ мкгн, сопротивление потерь $r_1=r_2=18$ ом. Частота генератора 500 кгц, эффективное значение э. д. с. генератора 400 мв. Определить индуктивность связи, емкости контуров, амплитуды токов в контурах и выходного напряжения, а также коэффициент передачи напряжения при полном резонансе.

3. 11. Два индуктивно связанных контура настроены на полный резонанс при частоте генератора 15 Мгц и амплитуде э. д. с. 6 в. Данные контуров: $C_1=C_2=20$ нф; $d_1=d_2=0,01$. Определить индуктивности контуров, взаимоиндуктивность, амплитуды токов в контурах и выходного напряжения, а также коэффициент передачи напряжения.

3. 12.* В двух индуктивно связанных контурах с коэффициентом связи $k=2k_{\text{кр}}$ установлен сложный резонанс. Параметры контуров: $L_1=L_2=L=3$ мкгн; $C_1=C_2=C=20$ нф; $r_1=r_2=r=3$ ом. Амплитуда э. д. с. генератора $\mathcal{E}_{m1}=15$ в. Определить амплитуды токов в контурах и выходного напряжения, а также частоты связи.

3. 13. Автотрансформаторная схема настроена на сложный резонанс при частоте 300 кгц и коэффициенте связи, в два раза большем критического. Оба контура имеют одинаковые параметры: собственную частоту 297 кгц и емкости по 350 нф. Питается схема генератором с амплитудным значением э. д. с. 20 в. Определить индуктивности и активные сопротивления контуров, амплитуды токов в них, амплитуду выходного напряжения и коэффициент передачи напряжения.

3. 14. В двух одинаковых контурах с трансформаторной связью установлен сложный резонанс при коэффициенте связи $k=5d$. Параметры контуров: $L_1=L_2=50$ мкгн; $C_1=C_2=125$ нф; $r_1=r_2=6,5$ ом. Амплитуда тока в первичном контуре 1 а. Определить резонансную длину волны, взаимоиндуктивность, амплитуду тока во вторичном контуре, коэффициент передачи напряжения и амплитуду выходного напряжения.

3. 15.* Имеются два идентичных индуктивно связанных контура (рис. 5, а), которые порознь настроены в резонанс с частотой

генератора и имеют параметры $L_1=L_2=60 \text{ мкГн}$; $C_1=C_2=300 \text{ пФ}$ и $r_1=r_2=5 \text{ Ом}$. Какой должна быть взаимная индуктивность между контурами, чтобы к. п. д. первичной цепи $\eta_{\text{п.к}}$ был равен 75%?

3. 16. Между двумя одинаковыми контурами с автотрансформаторной связью (рис. 5, б), каждый из которых имеет общую индуктивность $L=35 \text{ мкГн}$; емкость $C=135 \text{ пФ}$ и активное сопротивление $r=0,5 \text{ Ом}$, установлен коэффициент связи $k=0,02$. Частота э. д. с. генератора равна собственной частоте контуров. Определить элементы контура L_1 , L_2 , $L_{\text{св}}$ и к. п. д. первичной цепи $\eta_{\text{п.к}}$.

3. 17. Определить параметр η и коэффициент передачи напряжения K_0 при исходных данных предыдущей задачи.

3. 18.* Построить амплитудно-частотные характеристики системы из двух одинаковых связанных контуров, каждый из которых порознь настроен на частоту генератора и имеет добротность $Q=100$. Характеристики построить для трех значений коэффициента связи $k=0,004$; $0,01$; $0,02$.

3. 19. Определить, во сколько раз изменилась полоса пропускания при переходе от одиночного контура к связанной системе контуров, данные которой приведены в предыдущей задаче.

3. 20. При каком значении связи (параметра η) получается наибольшая полоса пропускания связанных контуров? Чему равна эта полоса? Построить амплитудно-частотную характеристику системы контуров, соответствующую данной полосе и $Q=100$.

3. 21. Какие условия необходимы для абсолютной прозрачности фильтра? Почему нельзя в полной мере выполнить эти условия?

3. 22. Какой физический смысл имеет то обстоятельство, что характеристическое сопротивление фильтра активно в полосе прозрачности и реактивно в полосе задерживания?

3. 23. Что называется непером и децибелом и какая существует зависимость между ними?

3. 24. При данной частоте сигнала одно звено фильтра вносит затухание $0,5 \text{ неп}$. Чему равно затухание всего десятизвенного фильтра на той же частоте?

3. 25.* Фильтр нижних частот имеет полосу прозрачности от нуля до 3 кГц . Нагрузкой фильтра служит активное сопротивление 500 Ом . Рассчитать элементы фильтра.

3. 26. Фильтр нижних частот имеет частоту среза $f_c=1 \text{ кГц}$. Чему равны индуктивность и емкость Т- и П-образных звеньев этого фильтра, согласованного с нагрузкой $R_{\text{н}}=2 \text{ ком}$?

3. 27. Фильтр нижних частот при Т-образном включении имеет в каждом звене емкость $C=2,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$. Рассчитать индуктивности звена и частоту среза при условии согласования фильтра с сопротивлением нагрузки 600 Ом .

3. 28.* Фильтр верхних частот с частотой среза $f_c=10^4 \text{ Гц}$ согласован с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}=1 \text{ ком}$. Рассчитать элементы фильтра.

3. 29. Фильтр верхних частот имеет в П-образном звене одну емкость $8 \cdot 10^3 \text{ пФ}$ и две индуктивности по 20 мГн . Определить ча-

стоту среза и сопротивление нагрузки, с которой фильтр может быть согласован на частоте $f \rightarrow \infty$.

3.30. Рассчитать фильтр высших частот с Т- и П-образными включениями звеньев при частоте среза 3 кГц и сопротивлении нагрузки 800 Ом.

3.31.* Рассчитать элементы полосового фильтра типа «к», имеющего полосу прозрачности $f_{c1} \div f_{c2} = 460 \div 470$ кГц при активной нагрузке $R_n = 1$ ком.

3.32. Рассчитать элементы полосового фильтра типа «к», имеющего полосу прозрачности $f_{c1} \div f_{c2} = 100 \div 125$ кГц при активной нагрузке 2,5 ком.

3.33. П-образный фильтр нижних частот типа «к» в каждом звене содержит индуктивность 0,12 Гн и две емкости по $1,2 \cdot 10^{-7}$ Ф. Как изменится схема и элементы этого звена при переходе к фильтру типа «п» с параметром $m = 0,6$?

Глава IV

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Погонные индуктивность L_1 и активное сопротивление R_1 проводов, емкость C_1 и активная проводимость (утечка) G_1 между проводами линии соответственно равны

$$L_1 = \frac{dL}{dx}; \quad R_1 = \frac{dR}{dx}; \quad C_1 = \frac{dC}{dx}; \quad G_1 = \frac{dG}{dx},$$

где dL, dR, dC, dG — параметры элементарного участка линии длиной dx .

Полное погонное сопротивление проводов линии

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1.$$

Полная погонная проводимость между проводами

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1.$$

Погонные параметры двухпроводной линии

$$L_1 = \frac{\mu a}{\pi} \ln \frac{a}{r_1}; \quad C_1 = \frac{\pi \epsilon a}{\ln \frac{a}{r_1}}, \quad (4.1)$$

где a — расстояние между осями проводов;

r_1 — радиус провода;

μ_a, ϵ_a — абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, разделяющей провода линии.

Погонные параметры коаксиальной линии

$$L_1 = \frac{\mu_a}{2\pi} \ln \frac{D}{d}; \quad C_1 = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln \frac{D}{d}}, \quad (4.2)$$

где D — внутренний диаметр внешнего провода;
 d — внешний диаметр внутреннего провода.

Волновое сопротивление двухпроводной линии

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{a}{r_1}, \quad (4.3)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Волновое сопротивление коаксиальной линии

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d}. \quad (4.4)$$

Мгновенные значения напряжения u_x и тока i_x на расстоянии x от конца линии без потерь, замкнутой на активное сопротивление $R_2 = Z_B$,

$$\left. \begin{aligned} u_x &= U_{m2} \sin(\omega t + \beta x); \\ i_x &= I_{m2} \sin(\omega t + \beta x), \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

где U_{m2} , I_{m2} — амплитуда напряжения и тока в конце линии;

$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \text{ рад/м} = \left(\frac{360}{\lambda}\right) \text{ град/м}$ — коэффициент фазы (волновое число).

Скорость распространения волн в линии

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \epsilon_a}}.$$

Для реальной линии, замкнутой на $R_2 = Z_B$,

$$\left. \begin{aligned} u_x &= U_{m2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x); \\ i_x &= I_{m2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x), \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где коэффициент затухания

$$\alpha = R_1 / 2Z_B \text{ nep/м}. \quad (4.7)$$

Активное сопротивление одного метра двухпроводной линии из медных проводов

$$R_1 = 2R'_1 = 2 \frac{0,72}{r \sqrt{\lambda}} = 2 \frac{4,16 \cdot 10^{-2} \sqrt{f}}{r} \text{ ом/м}, \quad (4.8)$$

где r — радиус провода в мм;

λ — длина волны в м;

f — частота в МГц.

Мгновенные значения напряжения и тока:
в разомкнутой линии

$$\left. \begin{aligned} u_x &= [U_{m2} \cos \beta x] \sin \omega t; \\ i_x &= \left[\frac{U_{m2}}{Z_B} \sin \beta x \right] \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

в короткозамкнутой линии

$$\left. \begin{aligned} u_x &= [I_{m2} Z_B \sin \beta x] \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \\ i_x &= [I_{m2} \cos \beta x] \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

При сопротивлении нагрузки $R_2 > Z_B$

$$\left. \begin{aligned} u_x &= U_{m2} k_{6.B} \sin(\omega t + \beta x) + [(1 - k_{6.B}) U_{m2} \cos \beta x] \sin \omega t; \\ i_x &= \frac{U_{m2}}{Z_B} k_{6.B} \sin(\omega t + \beta x) + \\ &+ \left[(1 - k_{6.B}) \frac{U_{m2}}{Z_B} \sin \beta x \right] \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

где $k_{6.B} = Z_B / R_2$ — коэффициент бегущей волны.

При сопротивлении нагрузки $R_2 < Z_B$

$$\left. \begin{aligned} u_x &= I_{m2} Z_B k_{6.B} \sin(\omega t + \beta x) + \\ &+ [I_{m2} Z_B (1 - k_{6.B}) \sin \beta x] \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right); \\ i_x &= I_{m2} k_{6.B} \sin(\omega t + \beta x) + [I_{m2} (1 - k_{6.B}) \cos \beta x] \sin \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

где $k_{6.B} = R_2 / Z_B$.

Действующие значения напряжения U_{ex} и тока I_{ex} в резонансных сечениях линии будут

$$U_{ex} = U_{e \text{ бег}} + U_{ec}; \quad I_{ex} = I_{e \text{ бег}} + I_{ec},$$

где $U_{e \text{ бег}}, I_{e \text{ бег}}$ соответствуют бегущим волнам, а U_{ec}, I_{ec} — стоячим волнам.

Коэффициент стоячей волны

$$k_{c.B} = \frac{1}{k_{6.B}} = \frac{U_{e \text{ max}}}{U_{e \text{ min}}} = \frac{I_{e \text{ max}}}{I_{e \text{ min}}}, \quad (4.13)$$

где $U_{e \text{ max}}, I_{e \text{ max}}$ — максимальные значения напряжения и тока в линии;

$U_{e \text{ min}}, I_{e \text{ min}}$ — минимальные значения напряжения и тока в линии.

В линии, замкнутой на реактивное сопротивление X_2 , амплитуды напряжения $U_{m\pi}$ и тока $I_{m\pi}$ в пучностях соответственно равны

$$U_{m\pi} = U_{m2} \frac{\sqrt{X_2^2 + Z_B^2}}{X_2}; \quad I_{m\pi} = \frac{U_{m2}}{Z_B} \frac{\sqrt{X_2^2 + Z_B^2}}{X_2}. \quad (4.14)$$

Резонансные сечения удалены от реактивной нагрузки X_2 на расстояние $\frac{k\lambda}{4} + l'$, где $k=0, 1, 2, 3, \dots$, а

$$l' = \frac{1}{\beta} \arccos \frac{X_2}{\sqrt{X_2^2 + Z_B^2}}. \quad (4.15)$$

Входное сопротивление:
линии, замкнутой на $R_2 = Z_B$,

$$Z_{BX} = Z_B;$$

разомкнутой линии без потерь

$$Z_{BX} = jX_{BX}, \text{ где } X_{BX} = -Z_B \operatorname{ctg} \beta x; \quad (4.16)$$

короткозамкнутой линии без потерь

$$Z_{BX} = jX_{BX}, \text{ где } X_{BX} = Z_B \operatorname{tg} \beta x; \quad (4.17)$$

линии без потерь, замкнутой на реактивное сопротивление X_2 ,

$$Z_{BX} = jX_{BX},$$

$$\text{где } X_{BX} = -Z_B \operatorname{ctg} [\beta(x-l')]; \quad (4.18)$$

линии, замкнутой на произвольную нагрузку Z_2 ,

$$Z_{BX} = R_{BX} + jX_{BX} = Z_B \frac{Z_2 + jZ_B \operatorname{tg} \beta x}{Z_B + jZ_2 \operatorname{tg} \beta x}, \quad (4.19)$$

где R_{BX} , X_{BX} — активная и реактивная составляющие входного сопротивления линии, формулы для которых после подстановки $Z_2 = R_2 + jX_2$ в (4.19) принимают вид

$$R_{BX} = \frac{Z_B^2 R_2}{Z_B^2 \cos^2 \beta x + (R_2^2 + X_2^2) \sin^2 \beta x - Z_B X_2 \sin 2\beta x}; \quad (4.20)$$

$$X_{BX} = Z_B \frac{(Z_B^2 - R_2^2 - X_2^2) \sin \beta x \cdot \cos \beta x + Z_B X_2 \cos 2\beta x}{Z_B^2 \cos^2 \beta x + (R_2^2 + X_2^2) \sin^2 \beta x - Z_B X_2 \sin 2\beta x}. \quad (4.21)$$

Модуль коэффициента отражения

$$\rho = \frac{k_{с.в} - 1}{k_{с.в} + 1} = \frac{1 - k_{6.в}}{1 + k_{6.в}}. \quad (4.22)$$

Волновое сопротивление четвертьволнового согласующего трансформатора

$$Z_{Bc} = \sqrt{Z_{B1} R_2}, \quad (4.23)$$

где Z_{B1} , R_2 — согласуемые сопротивления.

Волновые сопротивления $Z'_{в.с}$, $Z''_{в.с}$ двух трансформаторов длиной $\lambda_0/4$ каждый, которые обеспечивают широкополосное согласование сопротивлений $Z_{в1}$ и $Z_{в2}$:

$$Z'_{в.с} = \sqrt{Z_{в1} \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}}; \quad Z''_{в.с} = \sqrt{Z_{в2} \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}}. \quad (4.24)$$

Волновое сопротивление экспоненциального трансформатора на расстоянии x от его конца

$$Z_{вх} = Z_{в2} e^{-bx}, \quad (4.25)$$

где $Z_{в2}$ — волновое сопротивление трансформатора на его конце;
 b — параметр, который выбирается исходя из допустимого коэффициента стоячей волны $k_{с.в}$ в линии и максимальной длины волны $\lambda_{\max}$,

$$|b| = \frac{8\pi}{\lambda_{\max}} k_{с.в}. \quad (4.26)$$

Длина экспоненциального трансформатора

$$l = \frac{2,3}{b} \lg \frac{Z_{в2}}{Z_{в1}}, \quad (4.27)$$

где $Z_{в1}$, $Z_{в2}$ — волновые сопротивления трансформатора на его концах.

Коэффициент отражения для сечения идеальной линии, расположенного на расстоянии x от ее конца,

$$\rho = \rho_0 e^{j(\varphi_1 - 2\beta x)}, \quad (4.28)$$

где ρ_0 — модуль коэффициента отражения от нагрузки;

φ_1 — угол сдвига фазы между напряжениями (токами) отраженной и падающей волн на нагрузке.

Если согласование между двумя линиями с волновыми сопротивлениями $Z_{в1}$ и $Z_{в2}$ производится в диапазоне волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ посредством n промежуточных отрезков, имеющих волновые сопротивления $Z'_в$, $Z''_в$, $Z'''_в$ и соответственно длину l' , l'' , l''' , ..., то расчет их можно произвести при помощи таблицы для оптимальных (чебышевских) ступенчатых переходов.

Оптимальными считаются ступенчатые переходы, которые при постоянном волновом сопротивлении каждого перехода и наименьшей его длине l обеспечивают согласование с заданным коэффициентом отражения $\rho_{\max}$. В приложении III приведена таблица расчета двухступенчатого ($n=2$) перехода.

В таблице для каждого значения $\rho_{\max}$, коэффициента $N = Z_{в2}/Z_{в1}$ (где $Z_{в2} > Z_{в1}$) приведены значения волновых сопротивлений ступеней, отнесенные к $Z_{в1}$.

ЗАДАЧИ ¹

Параметры длинных линий. Образование волн в линиях

4.1. В линии, имеющей геометрическую длину $l=200$ м, распространяются волны с частотой 50 гц, а в другой линии длиной $l=5$ см — с частотой 6000 Мгц. Можно ли назвать эти линии длинными?

4.2.* Отрезок однородной двухпроводной линии длиной $l=1$ м при длине волны $\lambda \ll l$ имеет погонные параметры $L_1=3$ мкгн/м; $R_1=0,25$ ом/м; $C_1=923$ пф/м и $G_1=1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/ом·м. Нагрузкой линии служит активное сопротивление 100 ом. Можно ли представить эту цепь эквивалентной схемой, изображенной на рис. 7?

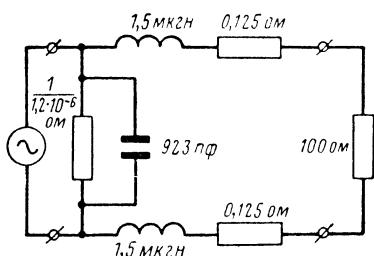


Рис. 7.

4.3. Двухпроводная линия имеет погонную индуктивность $L_1=1,2$ мкгн/м, погонную емкость $C_1=9,2$ пф/м и, кроме того, при частоте 20 Мгц имеет погонное активное сопротивление проводов $R_1=0,31$ ом/м и погонную активную проводимость между проводами $G_1=0,9 \cdot 10^{-7}$ 1/ом·м. Записать в комплексном виде для той же частоты полное погонное сопротивление Z_1 и полную погонную проводимость Y_1 линии.

4.4.* Линия имеет погонную активную проводимость $G_1=10^{-6}$ 1/ом·м. Можно ли сказать, что погонное активное сопротивление линии $R_1 = \frac{1}{G_1} = 10^6$ ом/м?

4.5.* Открытая двухпроводная линия с воздушным диэлектриком имеет расстояние между проводами $a=16$ мм и радиус проводов $r_1=2$ мм. Определить погонные индуктивность и емкость линии.

4.6. Провода открытой воздушной двухпроводной линии диаметром 5 мм расположены на расстоянии 100 мм. Определить погонные индуктивность проводов L_1 и емкость между ними C_1 .

4.7. Погонная индуктивность воздушной двухпроводной линии L_1 при радиусе проводов $r_1=1,5$ мм равна 0,9 мкгн/м. Требуется определить погонную емкость линии C_1 и расстояние между ее проводами a .

4.8. Определить относительную диэлектрическую проницаемость изоляции ϵ и погонную индуктивность L_1 двухпроводной линии, которая при диаметре проводов $2r_1=4$ мм и расстоянии между ними $a=20$ мм имеет погонную емкость $C_1=30,1$ пф/м.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

4.9. Доказать на основании формул (4.2), что для коаксиальной линии погонная индуктивность L_1 в мкГн/м и погонная емкость C_1 в нФ/м выражаются формулами

$$L_1 = 0,461 \lg \frac{D}{d} \text{ мкГн/м} \quad (4.29)$$

и

$$C_1 = \frac{24,1\epsilon}{\lg \frac{D}{d}} \text{ нФ/м}. \quad (4.30)$$

4.10. Коаксиальная линия без потерь с внутренним диаметром наружного провода $D = 22 \text{ мм}$ и внешним диаметром внутреннего провода $d = 5 \text{ мм}$ имеет сплошное заполнение диэлектриком с $\epsilon = 2,5$. Определить погонные параметры линии L_1 , C_1 .

4.11. Известны следующие данные коаксиальной линии: погонная индуктивность $0,25 \text{ мкГн/м}$, диаметр внутреннего провода 5 мм и относительная диэлектрическая проницаемость изоляции $\epsilon = 2,4$. Определить внутренний диаметр наружного провода и погонную емкость линии.

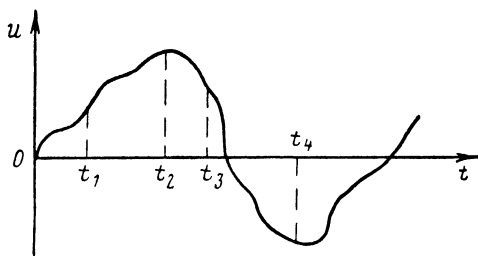


Рис. 8.

4.12. Определить волновое сопротивление линии по данным задачи 4.7.

4.13. Определить волновое сопротивление линии по данным задачи 4.8.

4.14. Определить волновое сопротивление линии по данным задачи 4.10.

4.15. Определить волновое сопротивление коаксиального кабеля, имеющего диаметр внутреннего провода $1,37 \text{ мм}$, диаметр внешнего провода 11 мм и заполнение из полиэтилена ($\epsilon = 2,3$).

4.16. Определить волновое сопротивление четырехпроводного воздушного фидера, в котором расстояние между проводами равно 286 мм и диаметр проводов $1,5 \text{ мм}$ (провода соединяются парно, накрест).

4.17. Чем объяснить, что в данный момент времени распределение напряжения и тока по длине линии имеет такую же форму, как временное изменение этих величин на зажимах генератора, питающего линию?

4.18. Бесконечно длинная линия без потерь питается от источника, напряжение которого изменяется во времени согласно графику на рис. 8. Как следует изобразить изменения напряжения

вдоль такой линии для моментов времени $t_1, t_2 > t_1, t_3 > t_2$ и $t_4 > t_3$?

4. 19. В комплексном виде напряжения $\dot{U}_1 = U_{m1} e^{j\omega t}$, $\dot{U}_2 = U_{m2} e^{\gamma} e^{j\psi} e^{j\omega t}$ и $\dot{U}_3 = U_{m3} \sin \alpha x e^{\gamma} e^{j\omega t} e^{j\vartheta}$. Написать уравнения мгновенных значений этих напряжений в тригонометрическом виде и выделить в них амплитуды квадратными скобками.

4. 20. Мгновенные значения токов $i_1 = I_{m1} \sin \omega t$; $i_2 = I_{m2} e^{\beta} \times \sin(\omega t + \varphi_0)$; $i_3 = I_{m3} e^{\gamma} \cos \alpha x \cdot \sin(\omega t + 90^\circ + \varphi_0)$.

Представить эти токи в комплексном виде.

Режим бегущих волн

4. 21. Преобразовать уравнения бегущих волн для идеальной линии (4.5) и для реальной линии (4.6) так, чтобы напряжение u_x и ток i_x были выражены через расстояние от начала линии. При этом обозначим: l — длина всей линии, а U_{m1} и I_{m1} — амплитуды напряжения и тока на зажимах генератора.

4. 22. Какой физический смысл имеют волновое сопротивление, коэффициенты фазы и затухания длинной линии? В каких единицах измеряются эти величины?

4. 23.* Коаксиальный кабель, работающий в режиме бегущих волн, имеет погонную индуктивность $L_1 = 0,26 \text{ мкГн/м}$. Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии $\epsilon = 2,5$. Определить сопротивление нагрузки кабеля и коэффициент фазы в кабеле при длине волны в воздухе $\lambda = 15 \text{ м}$.

4. 24.* Рассчитать и построить графики изменения напряжения и тока во времени в разных сечениях идеальной линии: в ее начале ($x=l$) и на расстоянии от начала 0,5 м и 1 м. Исходные данные: длина линии $l = 12 \text{ м}$, длина волны $\lambda = 4 \text{ м}$, амплитуда напряжения на входе $U_{m1} = 50 \text{ в}$, сопротивление нагрузки $R_2 = 100 \text{ ом}$ и волновое сопротивление линии $Z_{\text{в}} = 100 \text{ ом}$.

4. 25. Рассчитать для частоты $f = 60 \text{ МГц}$ и построить графики изменения амплитуды и действующих значений напряжения и тока вдоль коаксиального кабеля РК-8 длиной $l = 20 \text{ м}$, имеющего при указанной частоте затухание $\alpha = 3 \text{ неп/м}$ и замкнутого на активное сопротивление, равное волновому (75 ом). На входе кабеля включен генератор синусоидального напряжения с амплитудой $U_{m1} = 100 \text{ в}$. Какую форму приняли бы графики, если бы не было потерь в кабеле?

4. 26.* Воздушная двухпроводная линия из медных проводов радиусом $r = 2 \text{ мм}$ имеет длину $l = 50 \text{ м}$ и волновое сопротивление $Z_{\text{в}} = 600 \text{ ом}$. Требуется определить затухание в линии при работе ее в режиме бегущих волн и частоте 20 МГц .

4. 27. Двухпроводная линия, провода которой имеют радиус $r_1 = 1,5 \text{ мм}$ и расположены на расстоянии $a = 45 \text{ мм}$, заполнена диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью

$\varepsilon=2,5$. Определить погонные параметры линии L_1 , C_1 и сопротивление нагрузки R_2 при работе линии в режиме бегущих волн.

4.28. По данным задачи 4.27 определить погонное активное сопротивление R_1 и затухание, вносимое всей линией длиной $l=25$ м при длине волны в ней $\lambda_k=19,7$ м.

4.29. Определить фазовую постоянную волны, распространяющейся в кабеле с относительной диэлектрической проницаемостью изоляции $\varepsilon=2,25$ при частоте колебаний $f=10$ МГц.

4.30.* Коаксиальный кабель, работающий в режиме бегущих волн, имеет внутренний провод диаметром $d=0,68$ мм и наружный провод с внутренним диаметром $D=7,3$ мм. Сопротивление нагрузки кабеля $R_2=75$ ом. Требуется определить длину волны λ , при которой коэффициент затухания α , обусловленный потерями в меди, равен $3,5 \cdot 10^{-3}$ неп/м.

4.31. Коаксиальный кабель типа РК-3, работающий в режиме бегущих волн, имеет внутренний провод диаметром 1,37 мм, наружный провод с внутренним диаметром 9 мм и диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=2,3$. Требуется определить сопротивление нагрузки R_2 и частоту f , при которой коэффициент затухания, обусловленный потерями в меди, равен 0,07 дБ/м.

4.32. Какой физический смысл имеет входное и эквивалентное сопротивления линии? При каком условии входное сопротивление линии выражается такой же формулой, как эквивалентное сопротивление?

4.33. Чем объяснить, что линия без потерь, составленная только из реактивных сопротивлений (индуктивностей проводов и емкостей между проводами), имеет для бегущих волн в любом своем сечении активное эквивалентное сопротивление?

4.34.* Коаксиальный кабель работает в режиме бегущих волн. Требуется определить погонную индуктивность линии, если известно, что сопротивление нагрузки $R_2=50$ ом и погонная емкость линии $C_1=125$ пф/м.

4.35. Двухпроводная линия, имеющая радиус проводов 1,5 мм и относительную диэлектрическую проницаемость изолятора 2,5, работает в режиме бегущих волн при активном сопротивлении нагрузки 200 ом. Требуется определить погонные индуктивность и емкость линии, а также расстояние между осями проводов.

4.36. Определить для линии, данные которой приведены в предыдущей задаче, коэффициент затухания α , обусловленный потерями в меди при длине волны 5 м.

4.37.* Определить мощность, выделяемую на нагрузке двухпроводной линии, изготовленной из меди и замкнутой на активное сопротивление, равное волновому ($R_2=Z_v=600$ ом), если провода линии имеют радиус $r=3$ мм, длина линии $l=60$ м, длина волны генератора $\lambda=1$ м и мощность, подводимая от генератора к линии, $P_1=100$ Вт.

4.38. По данным задачи 4.26 определить к.п.д. линии.

Режим стоячих волн

4.39. Чем объяснить, что вдоль разомкнутой линии без потерь амплитуда напряжения изменяется по закону $\cos \beta x$, а амплитуда тока по закону $\sin \beta x$, несмотря на то, что падающая и отраженная волны, из которых складывается результирующая волна, имеют одинаковую амплитуду во всех сечениях линии?

4.40. Рассчитать и построить графики изменения амплитуды напряжения U_{mx} и тока I_{mx} вдоль разомкнутой линии без потерь при условии, что ток в пучности равен $I_{mп}=500$ *ма* и волновое сопротивление линии Z_v равно 50 *ом*. Расчет произвести для сечений $x=0$; $\frac{\lambda}{8}$; $\frac{\lambda}{4}$; $\frac{\lambda}{2}$; $\frac{3}{4}\lambda$; λ .

4.41. Рассчитать и построить графики изменений мгновенных значений напряжения u_x и тока i_x , происходящих в течение одного периода ($t=0, \frac{T}{12}, \frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3}{4}T, T$) в линии, данные которой приведены в задаче 4.40.

4.42. Какое входное сопротивление имеет разомкнутая линия без потерь длиной $x=0,25; 0,5; 1; 1,25$ *м* при длине волны $\lambda=1$ *м*? Какие напряжения и токи наблюдаются на входе этих линий?

4.43. Чем объяснить, что генератор, питающий разомкнутую линию, может оказаться работающим в режиме короткого замыкания, а генератор, питающий короткозамкнутую линию, — в режиме холостого хода? Какую длину при этом имеют линии?

4.44. Разомкнутая линия без потерь длиной 0,8 *м* при длине волны 4 *м* имеет входное сопротивление 32 *ом*. Определить характер этого сопротивления и волновое сопротивление линии.

4.45.* Разомкнутая линия без потерь, имеющая волновое сопротивление 50 *ом*, при длине волны 10 *м* представляет для генератора такую же нагрузку, как катушка индуктивности в 1 *мкГн*. Определить минимальную длину линии, удовлетворяющей этому условию.

4.46. Определить, какой индуктивности или емкости эквивалентен разомкнутый двухпроводный кабель КАТВ ($Z_v=300$ *ом*, $\epsilon=2,3$) длиной 16 *м* при частоте колебаний 5 *МГц*.

4.47. При длине волны в фидере 1 *м* и некоторой амплитуде напряжения генератора вместо разомкнутого фидера РК-19 ($Z_v=50$ *ом*, $\epsilon=2,3$) был включен конденсатор емкостью 5,3 *пФ*, при этом амплитуда тока генератора осталась неизменной. Какова длина фидера?

4.48.* В короткозамкнутом коаксиальном кабеле с волновым сопротивлением $Z_v=70$ *ом* на расстоянии $x=5$ *м* от конца кабеля проходит ток с амплитудой 100 *ма*. Требуется определить амплитудные значения напряжения U_{mx} и тока I_{mx} на расстояниях $x=0; 0,208; 0,417; 0,625; 0,833; 1,250; 1,875; 2,500$ *м* при длине волны $\lambda=2,5$ *м*. Построить графики зависимостей U_{mx} и I_{mx} от x .

4. 49.* Рассчитать мгновенные значения напряжений u_x и токов i_x в сечениях идеального короткозамкнутого кабеля с координатой $x=0, \frac{\lambda}{8}, \frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{4}\lambda, \lambda$ для моментов времени $t=0, \frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{5}{8}T, \frac{3}{4}T, T$, охватывающих один период колебаний T . Исходные данные: волновое сопротивление кабеля 200 ом, действующее значение напряжения генератора $U_{e2}=70,7$ в. Построить графики зависимостей u_x и i_x от x .

4. 50. В каких сечениях воздушной короткозамкнутой линии длиной 10 м при частоте 60 Мгц наблюдаются пучности и узлы напряжения и тока? Как изменится положение этих пучностей и узлов, если линию заполнить диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью 2,25?

4. 51.* Рассчитать и построить график зависимости входного сопротивления линии от ее длины при исходных данных задачи 4. 48.

4. 52.* Кабель РК-1 ($Z_b=75$ ом) длиной 14,5 м с изоляцией из полиэтилена ($\epsilon=2,3$) замкнут накоротко и питается генератором с частотой 50 Мгц. Определить входное сопротивление кабеля.

4. 53. Определить эквивалентную индуктивность или емкость короткозамкнутого радиочастотного кабеля РК-2 ($Z_b=90$ ом, $\epsilon=2,3$) длиной 12 м при частоте генератора, питающего кабель, 30 Мгц.

4. 54. Нагрузка на генератор не изменилась, когда вместо короткозамкнутого кабеля РК-6 ($Z_b=52$ ом, $\epsilon=2,3$) длиной 15 м включили конденсатор с емкостным сопротивлением 125 ом. На какой частоте работает генератор?

4. 55.* На индуктивности 10 мкГн, являющейся нагрузкой коаксиального кабеля РК-3 ($Z_b=70$ ом, $\epsilon=2,3$) амплитуда напряжения равна 100 в. Определить, на каких расстояниях от конца кабеля находится ближайшее резонансное сечение, каковы амплитудные значения напряжения и тока в пучностях, а также чему равна амплитуда тока в нагрузке, если длина волны в кабеле 40 м.

4. 56. При частоте 50 Мгц в двухпроводном кабеле КАТВ ($Z_b=300$ ом, $\epsilon=2,3$), замкнутом на реактивное сопротивление, пучность напряжения с амплитудой 50 в находится на расстоянии 0,6 м от нагрузки. Определить величину индуктивности (емкости), включенной в конце линии.

4. 57. Определить амплитуду напряжения на нагрузке кабеля U_{m2} по данным задачи 4. 56.

4. 58. Через конденсатор емкостью 100 пф, являющийся нагрузкой коаксиального кабеля РК-1 ($Z_b=77$ ом, $\epsilon=2,3$) проходит ток с амплитудой 0,5 а. Определить амплитуду напряжения в пучности $U_{m\pi}$ и минимальное расстояние от нагрузки l' , на котором находится резонансное сечение, если частота генератора $f=60$ Мгц.

4. 59. При исходных данных задачи 4. 58 определить амплитудные значения напряжения U_{mx} в сечениях кабеля, удаленных от его нагрузки на расстоянии $x=0; 0,25; 0,5; 1$ м.

4. 60. При исходных данных задачи 4. 58 определить амплитуды тока I_{mx} в сечениях кабеля, удаленных от его нагрузки на расстоянии $x=0; 0,25; 0,5; 1$ м.

4. 61. Определить расстояние l' от нагрузки воздушной линии с волновым сопротивлением 60 ом до ближайшего резонансного сечения при условии, что нагрузкой линии служит индуктивность $L=2,5$ мкГн и частота генератора $f=5$ МГц.

4. 62. Определить входное сопротивление отрезка коаксиального кабеля РК-1 ($Z_{в}=77$ ом, $\epsilon=2,3$) длиной 20 м, если нагрузкой его служит конденсатор емкостью 100 пФ при частоте генератора 60 МГц.

4. 63. Отрезок кабеля РК-19 ($Z_{в}=52$ ом, $\epsilon=2,3$) длиной 1 м замкнут на реактивное сопротивление и при частоте 60 МГц имеет входное сопротивление индуктивного характера, равное 100 ом. Определить индуктивность (емкость) нагрузки.

Режим смешанных волн

4. 64.* Двухпроводная линия без потерь, имеющая волновое сопротивление 600 ом, нагружена на активное сопротивление 1500 ом и питается от генератора, который вызывает на нагрузке падение напряжения с амплитудой 1 кВ. Определить амплитуды напряжения и тока бегущих, стоячих и результирующих волн в резонансных сечениях, а также коэффициенты бегущей и стоячей волн в линии.

4. 65. Какие предельные значения могут иметь коэффициенты бегущих и стоячих волн и каким режимам работы линии они соответствуют?

4. 66. Какой сдвиг по фазе между напряжениями (или токами) бегущих и стоячих волн наблюдается в резонансных сечениях линии? На каком расстоянии от конца линии находятся эти сечения, если линия замкнута на активное сопротивление, не равное волновому?

4. 67.* Линия длиной 15 м с волновым сопротивлением 500 ом замкнута на комплексное сопротивление $Z_2=100+j300$ ом при длине волны в линии 100 м. Вычислить входное сопротивление линии.

4. 68. Кабель РК-19 ($Z_{в}=52$ ом) длиной 10 см нагружен на комплексное сопротивление $Z_2=(40-j200)$ ом при длине волны в кабеле 60 см. Определить входное сопротивление кабеля.

4. 69. Почему на конце линии при комплексном сопротивлении ее нагрузки нет пучности или узла напряжения и тока? На каком расстоянии от нагрузки x , выраженном через длину волны λ , расположено ближайшее резонансное сечение линии в данном случае?

4. 70. В одной линии входное сопротивление активное и равно ее волновому сопротивлению, в другой — реактивное и в третьей—

комплексное. Какой характер имеет сопротивление нагрузки каждой из этих линий?

Круговые диаграммы полных сопротивлений линии

4.71. Чем отличаются коэффициенты отражения для произвольного сечения линии и для ее конца?

4.72. Рассчитать модули коэффициентов отражения, соответствующие коэффициентам бегущей и стоячей волн, указанным на рис. 9.

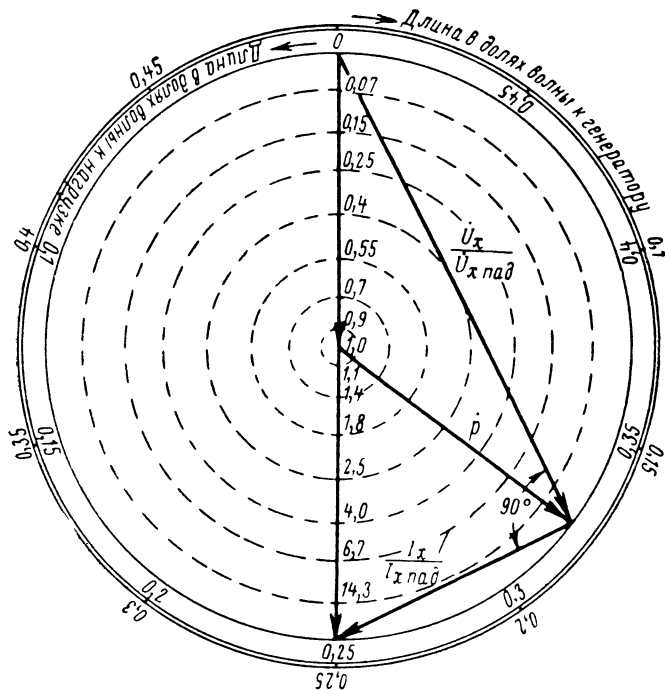


Рис. 9.

4.73.* Построить векторы коэффициентов отражения ρ для следующих значений координаты x , модуля ρ_0 и аргумента коэффициента отражения от нагрузки φ_1 :

а) $\rho_0=0$; $\varphi_1=0$, $x=0$, $\frac{\lambda}{10}$, $\frac{\lambda}{20}$, $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{\lambda}{2}$;

б) $\rho_0=0,2$; $\varphi_1=20^\circ$, $x=0,15\lambda$;

в) $\rho_0=0,7$; $\varphi_1=-35^\circ$; $x=0,4\lambda$;

г) $\rho_0=1$; $\varphi_1=0^\circ$; $x=0,6\lambda$.

4.74. Покажите на круговой диаграмме полных сопротивлений точки, соответствующие режиму бегущих волн, стоячих волн и сме-

шанных волн. Какие значения имеют коэффициенты отражения, бегущих и стоячих волн в этих точках?

4.75.* Определить при помощи круговой диаграммы проводимость, соответствующую сопротивлению $z=1,2+j0,85$.

4.76. Определить при помощи круговой диаграммы проводимость, соответствующую сопротивлению $z=0,5-j0,2$.

4.77. Определить при помощи круговой диаграммы сопротивление, соответствующее проводимости $y=0,3+j1,2$.

4.78.* Определить посредством круговой диаграммы входное сопротивление линии без потерь, замкнутой на сопротивление Z_2 с активной составляющей $R_2=150$ ом и реактивной составляющей $X_2=300$ ом. Волновое сопротивление линии $Z_{\text{в}}=75$ ом, длина линии $x=2$ м, длина волны $\lambda=10$ м.

4.79. Определить при помощи круговой диаграммы входное сопротивление линии без потерь, нагруженной на комплексное сопротивление $Z_2=R_2+jX_2=(1000-j1200)$ ом. Волновое сопротивление линии 400 ом, длина линии 10 м, частота 60 МГц.

4.80.* Определить входную проводимость линии без потерь длиной 0,12 λ , имеющей волновое сопротивление 100 ом и нагруженной на сопротивление $Z_2=R_2+jX_2=(50+j150)$ ом.

4.81. Определить при помощи круговой диаграммы входную проводимость линии без потерь длиной 1,5 м при длине волны 10 м и сопротивлении нагрузки $Z_2=(60+j120)$ ом. Волновое сопротивление линии равно 600 ом.

4.82.* Посредством измерительной линии было установлено, что коэффициент бегущей волны равен 0,2 и ближайший к нагрузке основной линии минимум напряжения находится в сечении с координатой $x=15$ см. Требуется определить полное сопротивление нагрузки при длине волны 80 см и волновом сопротивлении основной линии 125 ом.

4.83. Согласно показаниям измерительной линии коэффициент бегущей волны $k_{\text{б.в}}=0,5$ и ближайший к нагрузке основной линии минимум напряжения удален от нагрузки на расстояние 1,2 см. Волновое сопротивление линии 50 ом, длина волны 10 см. Требуется определить полное сопротивление нагрузки.

4.84.* Определить входную проводимость короткозамкнутой линии без потерь длиной $x=0,09\lambda$, имеющей волновое сопротивление 50 ом.

4.85. Определить входную проводимость короткозамкнутой линии без потерь, имеющей волновое сопротивление 300 ом и длину 1,32 λ .

4.86.* Рассчитать по круговым диаграммам, какой индуктивности или емкости эквивалентен короткозамкнутый кабель, имеющий длину 1,8 см, относительную диэлектрическую проницаемость 2,3 и волновое сопротивление 75 ом. Длина волны в кабеле $\lambda_{\text{к}}=2$ м.

4.87. Рассчитать по круговым диаграммам, какой индуктивности или емкости эквивалентен короткозамкнутый фидер длиной 60 см при частоте 100 МГц и относительной диэлектрической про-

нищаемости изоляции 2,3. Волновое сопротивление кабеля 50 ом.

4.88.* Определить входную проводимость и входное сопротивление разомкнутой линии без потерь, имеющей длину $0,12\lambda$ и волновое сопротивление 200 ом.

4.89. Определить, какой индуктивности или емкости эквивалентен разомкнутый кабель РК-19 ($Z_{\text{в}}=52$ ом, $\epsilon=2,3$) длиной 1 м при длине волны в кабеле 6 м.

Согласование сопротивлений

4.90. В чем физический смысл согласования сопротивлений при помощи четвертьволнового трансформатора? Почему трансформатор с обоих концов должен подключаться к сечениям с активным входным сопротивлением?

4.91. Определить волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора $Z_{\text{в.с}}$, согласующего отрезки двухпроводных линий с волновыми сопротивлениями $Z_{\text{в}1}=400$ ом и $Z_{\text{в}2}=600$ ом (рис. 10).

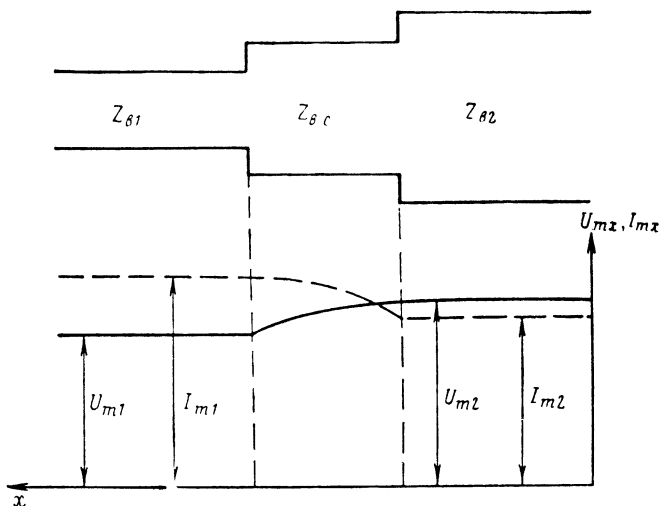


Рис. 10.

Вычислить также амплитуды напряжения U_{m2} и токов I_{m1} , I_{m2} на концах трансформатора, если известно, что амплитуда напряжения на первой линии $U_{m1}=100$ в.

4.92.* Определить волновые сопротивления $Z'_{\text{в.с}}$, $Z''_{\text{в.с}}$ двух четвертьволновых отрезков, образующих широкополосный трансформатор для согласования коаксиальных линий с волновыми сопротивлениями $Z_{\text{в}1}=50$ ом и $Z_{\text{в}2}=75$ ом.

4.93. Широкополосный трансформатор состоит из двух четвертьволновых отрезков с волновыми сопротивлениями $Z'_{\text{в.с}}=52$ ом

и $Z'_{в.с} = 65 \text{ ом}$. Чему равны волновые сопротивления согласуемых линий?

4.94.* Рассчитать экспоненциальный фидерный трансформатор, предназначенный для согласования антенны с активным входным сопротивлением 600 ом и фидера с волновым сопротивлением 300 ом . Фидер выполнен из двух медных проводов диаметром $2r = 3 \text{ мм}$. Допустимый $k_{с.в} = 1,1$ на волне $\lambda_{\max} = 80 \text{ м}$.

4.95. Рассчитать изменение волнового сопротивления вдоль экспоненциального трансформатора, составленного из двух проводов диаметром 3 мм . Остальные размеры трансформатора показаны на рис. 11. Как обозначается такой трансформатор?

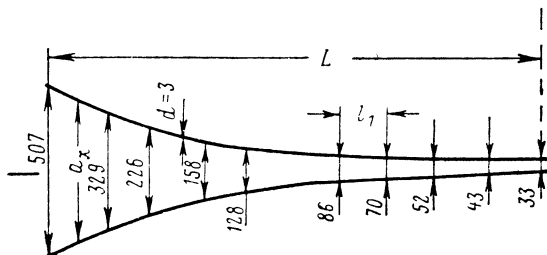


Рис. 11.

4.96.* Можно ли согласовать при помощи двухступенчатого чебышевского перехода две линии с волновыми сопротивлениями $Z_{в1} = 50 \text{ ом}$ и $Z_{в2} = 150 \text{ ом}$ в диапазоне частот $f_1 = 60 \text{ МГц}$ и $f_2 = 40 \text{ МГц}$ при модуле коэффициента отражения $p_{\max}$, не превышающем $0,02$?

4.97.* Определить волновые сопротивления двухступенчатого чебышевского перехода $Z'_в$, $Z''_в$ и длину каждого участка перехода l , если требуется согласовать две линии с волновыми сопротивлениями $Z_{в1} = 300 \text{ ом}$ и $Z_{в2} = 600 \text{ ом}$ при минимальной частоте $f_2 = 15 \text{ МГц}$ и максимальном значении модуля коэффициента отражения $p_{\max} = 0,1$. Какая максимальная частота рабочего диапазона f_1 допустима в данном случае?

4.98. Две линии с волновыми сопротивлениями $Z_{в1} = 50 \text{ ом}$ и $Z_{в2} = 80 \text{ ом}$ работают в диапазоне частот $f_2 = 100 \text{ МГц}$ и $f_1 = 200 \text{ МГц}$. Можно ли согласовать эти линии посредством двухступенчатого чебышевского перехода при максимальном коэффициенте отражения $p_{\max} = 0,05$? Если это возможно, то какой длины l должен быть каждый участок перехода и каковы их волновые сопротивления $Z'_в$, $Z''_в$?

4.99. Докажите, что в любой линии, замкнутой на комплексное или активное сопротивление, не равное волновому, имеется в пределах любого участка длиной $\lambda/4$ такое сечение, в котором активная составляющая эквивалентного сопротивления равна волновому сопротивлению линии. Почему именно в это сечение включается согласующий шлейф и в чем проявляется его действие?

4.100.* Определить место включения и длину шлейфа для согласования двухпроводного фидера с нагрузкой, если при помощи измерительной линии установлено, что в отсутствии шлейфа $k_{с.в.} = 4$ и расстояние от нагрузки до ближайшего минимума напряжения равно $0,19\lambda$.

4.101. Определить место включения и длину короткозамкнутого шлейфа для согласования коаксиального фидера с его нагруз-

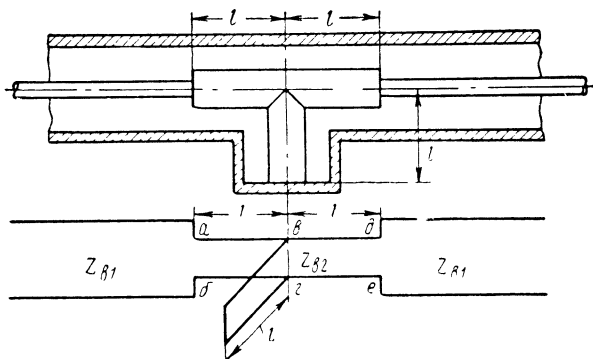


Рис. 12.

кой, имеющей комплексное сопротивление $Z_2 = (100 + j60) \text{ ом}$. Волновое сопротивление фидера 50 ом ; на максимальной длине волны рабочего диапазона 40 м допустимый $k_{с.в.} = 1,05$.

4.102.* Требуется определить длину l_1 и l_2 двух короткозамкнутых шлейфов, подключенных к основной линии на расстоянии $l_3 = \frac{3}{8}\lambda$ друг от друга, причем нагрузка имеет проводимость $Y_2 = (0,002 - j0,003) 1/\text{ом}$ и ближайший к нагрузке шлейф удален от нее на расстояние $l_4 = 0,15\lambda$. Волновое сопротивление линии $Z_B = 100 \text{ ом}$.

4.103.* Определить входную проводимость металлического изолятора, изображенного на рис. 12, при длине волны $\lambda = 1,15\lambda_0$ и волновых сопротивлениях $Z_{B1} = 100 \text{ ом}$, $Z_{B2} = 82 \text{ ом}$.

Глава V

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Объемная плотность тока проводимости

$$\delta_{\text{пр}} = \gamma E, \quad (5.1)$$

где γ — удельная проводимость,

E — напряженность электрического поля в данном проводнике.

Объемная плотность тока смещения

$$\delta_{\text{см}} = \varepsilon_a \frac{dE}{dt}, \quad (5.2)$$

где ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;
 E — напряженность электрического поля в данной среде.

Мгновенные значения напряженности электрического поля волны ТЕМ, распространяющейся по оси x :

$$E = E_m \sin(\omega t - \beta x), \quad (5.3)$$

где E_m — амплитуда напряженности электрического поля;
 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$ — коэффициент фазы волны.

Скорость распространения электромагнитных волн

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}};$$

$$\begin{aligned} \text{для воздуха (вакуума)} \quad \varepsilon_a = \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Дж/м, } \mu_a = \mu_0 = \\ = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \end{aligned}$$

и

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

Амплитуда напряженности магнитного поля волны ТЕМ

$$H_m = \frac{E_m}{Z_v},$$

где $Z_v = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ — волновое сопротивление среды.

Для свободного пространства $Z_v = Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi = 377 \text{ ом}$.

Объемные плотности энергий электрического и магнитного полей волны ТЕМ связаны следующей зависимостью:

$$\frac{\varepsilon_0 E_e^2}{2} = \frac{\mu_a H_e^2}{2}. \quad (5.4)$$

Плотность потока мощности (вектор Пойнтинга)

$$P = E_e H_e = E_e^2 / Z_v = H_e^2 Z_v. \quad (5.5)$$

ЗАДАЧИ¹

5.1.* Между обкладками плоского воздушного конденсатора с площадью одной пластины $S = 80 \text{ см}^2$ сосредоточено синусоидально изменяющееся электрическое поле, амплитуда которого $E_m =$

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

$=10^8$ в/м. Какой будет амплитуда тока смещения конденсатора при частотах поля $f=50$ гц и $f=50$ Мгц.

5.2. В последовательном колебательном контуре имеется синусоидальный ток с амплитудой $I_m=1$ а и частотой $f=1$ Мгц. Определить амплитуду напряженности поля между обкладками контурного конденсатора, состоящего из двух плоских пластин площадью $S=100$ см² каждая, разделенных слюдой ($\epsilon=6\epsilon_0$).

5.3. Через индуктивность последовательного колебательного контура, настроенного в резонанс, проходит синусоидальный ток с амплитудой $I_m=0,5$ а и частотой $f=10$ Мгц. Определить амплитуду напряженности поля между обкладками воздушного контурного конденсатора, состоящего из семи плоских пластин ($N=7$) площадью 50 см² каждая.

5.4.* Определить среднее значение энергии электрического поля в конденсаторе при расстоянии между его соседними пластинами $d=3$ мм. Остальные данные приведены в задаче 5.3.

5.5.* Плоская волна ТЕМ распространяется в однородном диэлектрике с параметрами $\epsilon_a=\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$, $\gamma=0$. Амплитуда напряженности электрического поля $E_m=10$ мв/м, а частота волны $f=300$ Мгц. Составить уравнения мгновенных значений напряженностей электрического и магнитного полей.

5.6. Написать уравнения электрического и магнитного полей плоской волны ТЕМ, распространяющейся в неограниченной среде с параметрами $\epsilon_a=3\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$ и $\gamma=0$. Амплитуда напряженности магнитного поля $H_m=10^{-6}$ а/м, а угловая частота $\omega=10^9$ рад/сек.

5.7. Определить фазовую скорость v , коэффициент фазы β и частоту f волны ТЕМ, распространяющейся с длиной волны 10 см в диэлектрике, параметры которого $\epsilon_a=3\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$ и $\gamma=0$.

5.8. Определить амплитуду напряженности электрического поля E_m волны ТЕМ, которая в диэлектрике с параметрами $\epsilon_a=4\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$ и $\gamma=0$, имеет амплитуду напряженности магнитного поля $H_m=10$ мка/м.

5.9. Определить фазовую скорость, коэффициент фазы, длину волны и волновое сопротивление волны ТЕМ, распространяющейся в среде с параметрами $\epsilon_a=2\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$ и $\gamma=0$ при частоте $f=100$ Мгц.

5.10. Определить длину волны и коэффициент фазы волны ТЕМ, имеющей частоту $f=10^7$ гц при распространении ее в воздухе ($\epsilon_{a1}=\epsilon_0$, $\mu_{a1}=\mu_0$, $\gamma_1=0$) и в полиэтилене ($\epsilon_{a2}=2,3\epsilon_0$, $\mu_{a2}=\mu_0$, $\gamma_2=0$).

5.11. Определить коэффициенты фазы β_1 , β_2 волны ТЕМ при распространении ее в средах с параметрами $\epsilon_{a1}=2\epsilon_0$, $\mu_{a1}=\mu_0$, $\gamma_1=0$ и $\epsilon_{a2}=4\epsilon_0$, $\mu_{a2}=\mu_0$, $\gamma_2=0$. Длина волны в первой среде $\lambda_1=5$ м.

5.12. Определить действующее значение напряженности магнитного поля H_e и плотность потока мощности волны ТЕМ, имеющей в среде с параметрами $\epsilon_a=4\epsilon_0$, $\mu_a=\mu_0$ и $\gamma=0$ амплитуду напряженности электрического поля $E_m=100$ мкв/м.

5.13. Линия без потерь соединяет генератор с нагрузкой. Расходуется ли электромагнитная энергия в случаях: а) совпадения полей E и H по фазе; б) сдвиге фазы между ними на 90° ; в) сдвиге фазы между E и H на произвольный угол?

5.14.* Волна ТЕМ в диэлектрике с параметрами $\epsilon_a = 9\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$ и $\gamma = 0$ имеет плотность потока мощности $\Pi = 2 \text{ мкВт/м}^2$. Определить действующие значения напряженностей электрического и магнитного полей волны.

5.15. Действующее значение напряженности магнитного поля $H_e = 20 \text{ мкА/м}$, параметры среды $\epsilon_a = 2\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\gamma = 0$. Определить амплитуду напряженности электрического поля E_m и плотность потока мощности Π .

5.16. В каком направлении относительно провода переносится электромагнитная энергия, если: а) ток в проводе совпадает по направлению с вектором электрического поля E , расположенным вне провода; б) ток направлен навстречу вектору E ?

5.17. Чем объясняется, что электрическое и магнитное поля, излучаемые вибратором со стоячей волной тока, совпадают по фазе, тогда как напряжение и ток на зажимах такой антенны сдвинуты по фазе почти на 90° ?

5.18. Какие условия необходимы для эффективного излучения электромагнитных волн?

Глава VI

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Отношение плотностей тока смещения и тока проводимости в данной среде, выраженное в комплексной форме:

$$\frac{\dot{\delta}_{\text{см}}}{\dot{\delta}_{\text{пр}}} = \frac{j\omega\epsilon_a \dot{E}}{\gamma \dot{E}} = j \frac{\omega\epsilon_a}{\gamma}. \quad (6.1)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость среды

$$\epsilon_a = \epsilon_a - j \frac{\gamma}{\omega}. \quad (6.2)$$

Углы падения $\theta_{\text{пад}}$, отражения $\theta_{\text{отр}}$ и преломления $\theta_{\text{пр}}$ связаны следующими зависимостями:

$$\theta_{\text{отр}} = \theta_{\text{пад}}; \quad \frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{\sin \theta_{\text{пр}}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6.3)$$

где $n_1 = \frac{c}{v_1}$ — показатель преломления первой среды;

$n_2 = \frac{c}{v_2}$ — показатель преломления второй среды.

Относительная диэлектрическая проницаемость слоя ионосферы, имеющего электронную концентрацию N при частоте f , равна

$$\epsilon' = 1 - 80,8 \frac{N}{f^2}, \quad (6.4)$$

где N в эл/см³; f в кГц.

Минимально применимая волна

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\text{кр}} \sin \delta, \quad (6.5)$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ — критическая длина волны отражающего слоя;

δ — угол наклона луча к земной поверхности.

Расстояние прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции (геометрический горизонт)

$$D = 3,57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ км}, \quad (6.6)$$

где h_1, h_2 — высоты передающей и приемной антенн в м.

Расстояние прямой видимости при нормальной атмосферной рефракции (радиогоризонт)

$$D = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ км}. \quad (6.7)$$

ЗАДАЧИ¹

6.1.* Определить отношение плотности тока смещения к плотности тока проводимости в морской воде ($\epsilon_a = 80 \epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$ и $\gamma = 4 \text{ 1/ом} \cdot \text{м}$) для волн с частотами $f = 10^4$; 10^6 ; 10^8 гц .

6.2. Сравните отношения плотностей токов смещения и проводимости в морской воде ($\epsilon_a = 80 \epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\gamma = 4 \text{ 1/ом} \cdot \text{м}$) и сухой почве ($\epsilon_a = 4 \epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\gamma = 0,001 \text{ 1/ом} \cdot \text{м}$) при частоте $f = 10^8 \text{ гц}$.

6.3.* Из воздуха ($\epsilon_{a1} = \epsilon_0$, $\mu_{a1} = \mu_0$, $\gamma = 0$) на плоскость, отделяющую его от полиэтилена ($\epsilon_{a2} = 2,3 \epsilon_0$, $\mu_{a2} = \mu_0$, $\gamma = 0$), под углом $\theta_{\text{пад}} = 0$ падает электромагнитная волна. Определить углы отражения $\theta_{\text{отр}}$ и преломления $\theta_{\text{пр}}$, а также коэффициент бегущей волны в первой среде $k_{б.в.}$.

6.4.* Определить амплитудное значение напряженности электрического поля в воздухе и полиэтилене при амплитуде результирующего поля на плоскости раздела двух сред $E_m = 0,5 \text{ мв/м}$, коэффициенте бегущей волны и фазовой постоянной в воздухе соответственно: $k_{б.в.} = 0,66$; $\beta_1 = 0,21 \text{ рад/м}$.

6.5. Определить коэффициент бегущей волны $k_{б.в.}$ в среде с параметрами $\epsilon_{a1} = 2 \epsilon_0$, $\mu_1 = \mu_0$, $\gamma_1 = 0$, если из этой среды на другую с параметрами $\epsilon_{a2} = 4 \epsilon_0$, $\mu_2 = \mu_0$, $\gamma_2 = 0$ падают электромагнитные волны под углом $\theta_{\text{пад}} = 0$ к плоскости раздела сред.

6.6. Результирующее магнитное поле на границе раздела двух сред имеет амплитуду $H_m = 1 \text{ мка/м}$. Определить амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей бегущей

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

волны $E_{m\beta 1}$, $H_{m\beta 1}$ и стоячей волны $E_{m\sigma 1}$, $H_{m\sigma 1}$ в первой среде и бегущей волны $E_{m\beta 2}$, $H_{m\beta 2}$ во второй среде, если фазовые постоянные для этих сред $\beta_1 = 72 \text{ град/м}$; $\beta_2 = 102 \text{ град/м}$, а коэффициент бегущей волны $k_{б.в} = 0,705$.

6.7. Электромагнитные волны с частотой $f = 10^9 \text{ гц}$ из вакуума ($\epsilon_{a1} = \epsilon_0$, $\mu_{a1} = \mu_0$, $\gamma_1 = 0$) падают под углом $\theta_{\text{пад}} = 30^\circ$ на плоскость, с которой начинается другая среда ($\epsilon_{a2} = 3\epsilon_0$, $\mu_{a2} = \mu_0$, $\gamma_2 = 0$). Определить углы отражения $\theta_{\text{отр}}$ и преломления $\theta_{\text{пр}}$ и длины волн в обеих средах.

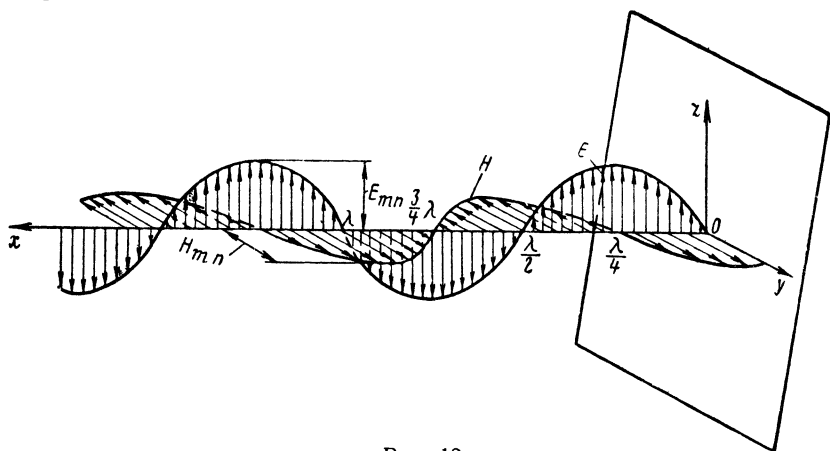


Рис. 13.

6.8. Обосновать рис. 13, на котором показано, как изменяются амплитудные значения напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей плоской волны ТЕМ, распространяющейся в идеальном диэлектрике перпендикулярно идеально проводящей плоскости.

6.9. На каком расстоянии x от границы раздела диэлектрика с параметрами $\epsilon_a = 9\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$, $\gamma = 0$ и идеального проводника находятся пучности и узлы напряженностей полей E_m , H_m волны ТЕМ, имеющей частоту $f = 10^8 \text{ гц}$?

6.10. Волна ТЕМ падает из диэлектрика с параметрами $\epsilon_a = 4\epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$ и $\gamma = 0$ на плоскую поверхность идеального проводника. Частота волны $f = 3 \cdot 10^9 \text{ гц}$, амплитуда напряженности электрического поля падающей волны $E_{m\text{пад}} = 100 \text{ мв/м}$. Определить амплитуды напряженностей полей в пучностях и узлах и место расположения узлов и пучностей относительно границы раздела двух сред.

6.11. Электромагнитные волны с амплитудой напряженности электрического поля $E_{m\text{пад}} = 1 \text{ мв/м}$, распространяясь в диэлектрике ($\epsilon = 2,25$, $\mu = \mu_0$, $\gamma = 0$), падают на плоскую поверхность идеального проводника. Определить максимальные амплитуды напряженностей полей.

6.12.* Выразить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость ϵ через длину волны λ , измеряемую в метрах.

6.13. Для частоты $f=600$ Мгц определить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость среды ϵ , имеющей относительную проницаемость $\epsilon=50$ и удельную проводимость $\gamma=4 \cdot 10^{-3}$ 1/ом·м. Каково соотношение между токами смещения и проводимости в данной среде?

6.14.* Определить критическую длину волны слоя ионосферы с электронной концентрацией $2,5 \cdot 10^5$ э/см³.

6.15. Слой E ионосферы в южных широтах имеет электронную концентрацию $N=2,5 \cdot 10^5$ э/см³. Чему равны показатели преломления на этой высоте при частотах $f=5$; 20 Мгц?

6.16. Слой ионосферы имеет концентрацию электронов $N=1,5 \cdot 10^4$ э/см³. Каковы показатели преломления ионосферы n для частот $f=5$ Мгц и 20 Мгц?

6.17. Какой электронной концентрации ионизированного слоя соответствует критическая длина волны 30 м?

6.18. На слой ионосферы F_2 с критической длиной волны $\lambda_{кр}=30$ м падают электромагнитные волны под различными углами. Определите минимально применимую длину волны λ_{min} при отвесном падении ($\delta=90^\circ$) и при углах наклона лучей $\delta=60, 30, 10^\circ$.

6.19. Передающая и приемная антенны имеют высоты $h_1=h_2=10$ м. Определить расстояние D прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции и при наличии нормальной атмосферной рефракции.

6.20. Определить расстояние прямой видимости при отсутствии атмосферной рефракции и наличии нормальной атмосферной рефракции, если высота передающей антенны $h_1=100$ м, а приемной — $h_2=10$ м.

Глава VII

КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Сопротивление излучения антенны

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_e^2}, \quad (7.1)$$

где P_{Σ} — излучаемая мощность;

I_e — действующее значение тока в сечении антенны, к которому отнесено R_{Σ} .

Сопротивление потерь

$$R_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{I_e^2}, \quad (7.2)$$

где P_{π} — мощность потерь в антенне;
 I_e — действующее значение тока в сечении, к которому отнесено R_{π} .

Активное сопротивление антенны

$$R_a = \frac{P_a}{I_e^2} = R_{\Sigma} + R_{\pi}, \quad (7.3)$$

где P_a — мощность, подводимая к передающей антенне.

К. п. д. антенны

$$\eta_a = \frac{R_{\Sigma}}{R_a} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{\pi}}. \quad (7.4)$$

Коэффициент усиления антенны G связан с ее коэффициентом направленного действия D зависимостью

$$G = D\eta_a. \quad (7.5)$$

Э. д. с., индуктируемая в приемной антенне,

$$\mathcal{E}_a = E h_d, \quad (7.6)$$

где E — составляющая напряженности электрического поля, параллельная проводу антенны;

h_d — действующая высота антенны.

Эффективная поверхность антенны

$$S_{\text{эф}} = P/\Pi, \quad (7.7)$$

где P — мощность, улавливаемая антенной;

Π — плотность потока мощности (вектор Пойнтинга).

ЗАДАЧИ¹

7.1. Антенна излучает мощность $P_{\Sigma} = 100$ вт при мощности потерь $P_{\pi} = 400$ вт. Определить сопротивления излучения $R_{\Sigma 0}$, $R_{\Sigma \pi}$ и потерь $R_{\pi 0}$, $R_{\pi \pi}$, отнесенные соответственно к току в основании, имеющего амплитуду $I_{m0} = 10$ а и к току в пучности, имеющего амплитуду $I_{m\pi} = 15$ а.

7.2. Вибратор имеет сопротивление излучения 5 ом и к. п. д. 25%. Определить сопротивление потерь R_{π} и активное сопротивление вибратора R_a при условии, что все эти сопротивления отнесены к одному и тому же сечению вибратора?

7.3. Построить диаграммы направленности антенны в прямоугольных координатах по данным, приведенным в табл. 1 (рис. 14).

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

Таблица 1

Угол θ , характеризующий направление в град	0	± 5	± 10	± 15	± 20	± 27	± 30	± 38
Плотность потока мощности Π в вт/м^2	230	92	38	3,8	0,165	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$57,5 \cdot 10^{-2}$	$38 \cdot 10^{-2}$
Продолжение								
Угол θ , характеризующий направление в град	45	52	60	70	80	90		
Плотность потока мощности Π в вт/м^2	$88 \cdot 10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-3}$	$74 \cdot 10^{-3}$	$23 \cdot 10^{-2}$	$20,6 \cdot 10^{-2}$	$57,5 \cdot 10^{-3}$		

7.4. Построить на основании данных, приведенных в табл. 1, нормированные диаграммы направленности антенны по мощности и напряженности поля.

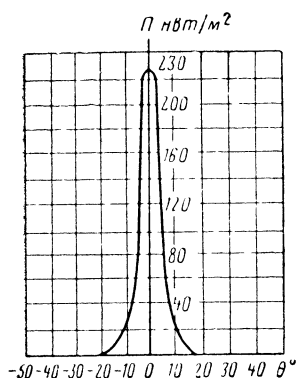


Рис. 14.

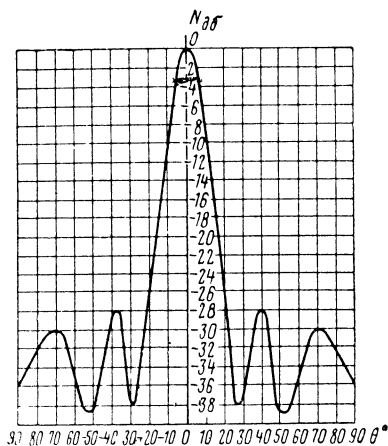


Рис. 15.

7.5. Рассчитать и построить диаграммы направленности по мощности, согласно данным табл. 1, выражая плотность потока мощности в дБ и принимая за исходный такой уровень, который соответствует максимуму излучения.

7.6. Определить ширину диаграммы направленности антенны по рис. 15.

7.7. В чем различие между коэффициентами усиления и направленного действия передающей антенны? Какая между ними существует зависимость?

7.8. Антенны имеют коэффициенты направленного действия 1,58; 4; 10; 50; 100; 2000 и коэффициенты усиления 1,26; 2; 8; 15; 1000. Выразить эти коэффициенты в децибелах.

7.9. Антенна имеет коэффициент направленного действия 100, сопротивление излучения 95 ом и сопротивление потерь 5 ом.

Определить коэффициент усиления антенны.

7.10. Коэффициент усиления антенны 8 дб, а коэффициент направленного действия 10 дб. Каково сопротивление потерь этой антенны при сопротивлении излучения 4 ом?

7.11. Определить уровень боковых лепестков в дб по диаграмме (см. рис. 15).

7.12. Дайте определение коэффициентов направленного действия и усиления передающей и приемной антенн.

7.13. Определить действующую высоту приемной антенны, в которой при напряженности электрического поля 25 мв/м возбуждается э. д. с., равная 125 мв.

7.14. Электромагнитная волна с вектором напряженности электрического поля $\vec{E}$, расположенным под углом 30° к вибратору, действующая высота которого $h_d = 10$ м, индуцирует в нем э. д. с. $\mathcal{E}_a = 500$ мкв. Какова напряженность электрического поля волны?

7.15. Антенна улавливает мощность $P = 10$ мквт при плотности потока мощности электромагнитной волны $\Pi = 2$ мквт/м². Определить эффективную поверхность антенны $S_{эфф}$.

7.16. Определить мощность P , улавливаемую антенной с эффективной поверхностью $S_{эфф} = 2$ м², если амплитуда напряженности электрического поля волны $E_m = 5$ мкв/м.

Глава VIII

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРИЕМА РАДИОВОЛН

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Амплитуда напряженности электрического поля элементарного вибратора на расстоянии r от него под зенитным углом θ равна

$$E_m = \frac{60\pi I_m l}{r\lambda} \sin \theta, \quad (8.1)$$

где I_m — амплитуда тока в вибраторе;
 l — длина вибратора.

Сопротивление излучения элементарного вибратора

$$R_z = 800 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2. \quad (8.2)$$

Амплитуда напряженности электрического поля симметричного вибратора длиной l

$$E_m = \frac{60I_m}{r} \frac{\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta\right) - \cos \frac{\pi l}{\lambda}}{\sin \theta}, \quad (8.3)$$

где I_m — амплитуда тока в пучности.

Угол θ отсчитывается от оси вибратора.

Для горизонтального вибратора, расположенного на высоте h над идеально проводящей поверхностью земли,

$$E_m = \frac{120I_m}{r} \left(1 - \cos \frac{\pi l}{\lambda}\right) \sin(\beta h \sin \delta), \quad (8.4)$$

а для вертикального вибратора в аналогичных условиях

$$E_m = \frac{120I_m}{r} \frac{\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \delta\right) - \cos \frac{\pi l}{\lambda}}{\cos \delta} \cos(\beta h \sin \delta), \quad (8.5)$$

где δ — угол наклона луча к земной поверхности;

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ — коэффициент фазы.

Действующая высота вертикального заземленного вибратора с геометрической высотой h

$$h_d = \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta h}{2}}{\beta}. \quad (8.6)$$

При длине $l \ll \lambda$ (высоте $h \ll \lambda$) действующая высота $h_d = \frac{l}{2}$ ($h_d = \frac{h}{2}$).

Амплитуда напряженности поля симметричного вибратора, выраженная через его действующую высоту h_d ,

$$E_m = \frac{60\pi I_m h_d}{r\lambda} F(\theta), \quad (8.7)$$

где $F(\theta)$ — уравнение нормированной диаграммы направленности вибратора.

При $h \leq \frac{\lambda}{4}$ и $l \leq \frac{\lambda}{2}$ сопротивление излучения симметричного и заземленного вибраторов соответственно равны

$$R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_d}{\lambda}\right)^2; \quad R_{\Sigma} = 1600 \left(\frac{h_d}{\lambda}\right)^2. \quad (8.8)$$

Между сопротивлениями излучения, отнесенными к току в пучности ($R_{\Sigma п}$) и к току у основания ($R_{\Sigma о}$) вибратора высотой h , существует зависимость

$$R_{\Sigma п} = R_{\Sigma о} \sin^2 \beta h. \quad (8.9)$$

Коэффициент направленного действия вибратора

$$D = \frac{120\pi^2 \left(\frac{h_\lambda}{\lambda}\right)^2}{R_\Sigma}. \quad (8.10)$$

Для элементарного вибратора $D=1,5$, для полуволнового $D=1,64$, для четвертьволнового заземленного (при идеальной проводимости земли) $D=3,28$.

Входное сопротивление вибратора при питании его в пучности тока (последовательном резонансе)

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} = R_\Sigma + R_\Pi, \quad (8.11)$$

где R_Σ , R_Π — сопротивления излучения и потерь, отнесенные к зажимам вибратора.

При питании вибратора в пучности напряжения (параллельном резонансе)

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{в.а}}^2}{R_{\Sigma\Pi}}, \quad (8.12)$$

где $Z_{\text{в.а}}$ — волновое сопротивление вибратора;

$R_{\Sigma\Pi}$ — сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока.

При отсутствии резонанса в симметричном вибраторе длиной l реактивная составляющая входного сопротивления

$$X_{\text{вх}} = -Z_{\text{в.а}} \operatorname{ctg} \left(\beta \frac{l}{2} \right). \quad (8.13)$$

Волновое сопротивление вибратора определяется по формуле

$$Z_{\text{в.а}} = 120 \left(\ln \frac{l}{r} - 1 \right) \quad (8.14)$$

или

$$Z_{\text{в.а}} = 120 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi r} - 0,577 \right), \quad (8.15)$$

где r — радиус вибратора.

Геометрическая длина полуволнового вибратора с учетом эффекта укорочения равна

$$\frac{\lambda}{2} - 2\Delta l = \frac{\lambda}{2} - \frac{42,5\lambda}{\pi Z_{\text{в.а}}}. \quad (8.16)$$

Действующее значение напряженности поля на расстоянии r от антенны при отсутствии отражения волн от земли (формула идеальной радиопередачи)

$$E_e = \frac{173 \sqrt{P_\Sigma D}}{r} \text{ мВ/м}, \quad (8.17)$$

а в непосредственной близости от идеально проводящей земли

$$E_e = \frac{245 \sqrt{P_{\Sigma} D}}{r} \text{ мВ/м}, \quad (8.18)$$

где P_{Σ} в кВт и r в км.

Влияние рефлектора на диаграмму направленности многовибраторной антенны учитывается уравнением

$$f(\varphi) = 2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \cos \varphi \right), \quad (8.19)$$

где угол φ отсчитывается от перпендикуляра к плоскости антенны.

Амплитуда напряженности поля E_m провода с бегущей волной тока длиной l

$$E_m = \frac{60 I_m}{r} \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} \sin \left[\frac{\beta l}{2} (1 - \cos \varphi) \right], \quad (8.20)$$

где φ — угол, образованный данным направлением с осью провода.

Направления нулевого излучения ($\varphi = \varphi_0$) определяются из уравнения

$$\cos \varphi_0 = 1 - \frac{k\lambda}{l}, \quad (8.21)$$

а направления максимального излучения из уравнения

$$\cos \varphi_{\max} \approx 1 - \frac{(2k+1)\lambda}{2l}, \quad (8.22)$$

где $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Нормированные диаграммы направленности прямоугольного и круглого отверстий с синфазным и равномерным полем выражаются соответственно уравнениями:

$$F(\varphi_a, \varphi_b) = \frac{\sin \left(\frac{\pi a}{\lambda} \cos \varphi_a \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \cos \varphi_a} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi b}{\lambda} \cos \varphi_b \right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \cos \varphi_b}, \quad (8.23)$$

$$F(\varphi) = \frac{J_1(u)}{u}, \quad (8.24)$$

где a, b — размеры сторон прямоугольного отверстия;

φ_a, φ_b — углы между направлениями в пространстве и сторонами a, b ;

$J_1(u)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка;

$u = \pi d \sin \varphi$ — аргумент этой функции;

φ — угол, отсчитываемый от оси, которая перпендикулярна плоскости отверстия;

d — диаметр отверстия.

Ширина диаграммы направленности $2\varphi'_a$ прямоугольной площадки в плоскости, соответствующей размеру a , при равномерном и синфазном возбуждении площадки равна

$$2\varphi'_a = \left(51 \frac{\lambda}{a}\right) \text{ град.} \quad (8.25)$$

Ширина диаграммы направленности $2\varphi'$ круглой площадки диаметром d при равномерном и синфазном ее возбуждении

$$2\varphi' = \left(59,6 \frac{\lambda}{d}\right) \text{ град.} \quad (8.26)$$

ЗАДАЧИ¹

8.1. Элементарный вибратор длиной $l=1$ м с амплитудой $I_m=10$ а излучает электромагнитные волны, длина которых $\lambda=10$ м. Требуется определить амплитуды напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей и плотность Π потока мощности на расстоянии $r=10$ км от вибратора в его экваториальной плоскости.

8.2. Определить амплитудные значения напряженности электрического и магнитного полей вибратора, а также плотность потока мощности в направлениях, соответствующих зенитным углам $\theta=0; 30; 60^\circ$, при исходных данных задачи 8.1.

8.3.* Вибратор с равномерным распределением тока при длине $l=20$ см и токе с амплитудой $I_m=20$ а излучает электромагнитные волны, которые на расстоянии $r=10$ км, отсчитанном в экваториальной плоскости, имеют плотность потока мощности $\Pi=5 \times 10^{-10}$ вт/м². Требуется определить частоту тока f в вибраторе и амплитуды напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей на этом расстоянии.

8.4. Элементарный вибратор длиной $l=5$ см излучает в свободном пространстве электромагнитные волны длиной $\lambda=5$ м и мощностью $P_{\Sigma}=10$ вт. Каковы напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей и плотность Π потока мощности вибратора на расстоянии 1 км в экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$) и под углами 60 и 45° к этой плоскости?

8.5. Элементарный вибратор излучает электромагнитные волны мощностью 20 вт при сопротивлении излучения 5 ом. Какую величину имеют амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей на расстоянии 2 км от вибратора в его экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$) и под зенитными углами 15 и 30°.

8.6.* Определить, во сколько раз благодаря направленности элементарного вибратора возрастает плотность потока излучаемой им мощности в экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$) и в направлениях, соответствующих зенитным углам $\theta=15, 30, 45, 60^\circ$.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

8. 7. Полуволновый вибратор питается током с амплитудой $I_m = 1$ а в пучности. Каковы действующие значения напряженностей электрического E_e и магнитного H_e полей этого вибратора на расстоянии $r = 15$ км, отсчитанном в экваториальной плоскости?

8. 8. Определить амплитудные значения напряженностей полей E_m и H_m полуволнового вибратора на расстоянии 30 км от него в экваториальной плоскости при амплитуде тока в пучности 3 а.

8. 9. По данным задачи 8. 8 определить E_m и H_m в направлениях, соответствующих зенитным углам $\theta = 60^\circ$; 30° .

8. 10. Плотность потока мощности, излучаемой полуволновым вибратором в экваториальной плоскости на расстоянии 10 км от вибратора равна $0,2$ мквт/м². Каково действующее значение тока I_e вибратора в пучности?

8. 11. * Плотность потока мощности, излучаемой полуволновым вибратором в направлении, соответствующем зенитному углу $\theta = 30^\circ$, оказалась равной 10^{-7} вт/м². На каком расстоянии произведены измерения, если ток вибратора имеет в пучности действующее значение $I_e = 15$ а.

8. 12. Поток мощности, излучаемой полуволновым вибратором в направлении зенитного угла 60° , имеет на расстоянии 10 км от вибратора плотность $2 \cdot 10^{-8}$ вт/м². Чему равна амплитуда I_m тока вибратора в пучности?

8. 13. * Симметричный вибратор длиной $l = \lambda$ в направлении максимального излучения ($\theta = 90^\circ$) на расстоянии 240 км от вибратора возбуждает волны с амплитудой напряженности электрического поля $E_m = 1$ мв/м. Требуется определить амплитуду тока вибратора в пучности.

8. 14. * Рассчитать и построить диаграмму направленности симметричного вибратора, имеющего длину $1,5\lambda$ в меридиональной плоскости.

8. 15. Горизонтальный полуволновый вибратор расположен на высоте λ над идеально проводящей поверхностью земли. Определить амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей вибратора на расстоянии 50 км вдоль поверхности земли ($\delta = 0$) и под углами места $\delta = 5^\circ$; 10° , если действующее значение тока в пучности равно 3 а.

8. 16. * Горизонтальный вибратор подвешен над землей на высоте $h = \lambda$. Какой разности хода волн Δr от этого вибратора и его зеркального изображения соответствуют максимумы и минимумы излучения вибратора? Сколько лепестков в диаграмме направленности вибратора в вертикальной плоскости?

8. 17. Горизонтальный вибратор подвешен над землей на высоте $h = 2\lambda$. Какой разности хода волн Δr от этого вибратора и его зеркального изображения соответствуют максимумы и минимумы излучения вибратора? Сколько лепестков в диаграмме направленности вибратора в вертикальной плоскости?

8. 18. Доказать, что число лепестков в диаграмме направленности в вертикальной плоскости горизонтального вибратора, подве-

шенного над идеально проводящей землей на высоте h , всегда равно целому числу четвертой длины волн, укладываемых в высоту подвеса.

8. 19.* Рассчитать и построить диаграмму направленности горизонтального вибратора в вертикальной плоскости, если вибратор находится на высоте $h=\lambda$ и ось его перпендикулярна этой плоскости.

8. 20. Вертикальный вибратор длиной, равной λ , имеет высоту подвеса, равную 2λ . Какими уравнениями выражаются мгновенные значения напряженностей полей E , H и нормированная диаграмма направленности $E(\delta)$ такого вибратора?

8. 21.* Четвертьволновый заземленный вибратор питается синусоидальным током с амплитудой $I_m=1,2$ а. Чему равны амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей вибратора на расстоянии $r=10$ км от антенны, отсчитанном на поверхности земли, и под углом места $\delta=10^\circ$, если распространение волн происходит в идеальных условиях?

8. 22. Вертикальный заземленный вибратор высотой $h=1$ м излучает волны длиной $\lambda=20$ м. Определить действующую высоту вибратора h_d .

8. 23. Определить действующую высоту симметричного вибратора длиной $l=10$ см, который, находясь в свободном пространстве, излучает волны длиной $\lambda=2$ м.

8. 24. Определить действующую высоту и сопротивление излучения заземленного вибратора высотой 60 м при длине волны 400 м.

8. 25.* Определить погрешность вычисления сопротивления излучения четвертьволнового заземленного и полуволнового симметричного вибраторов по их действующим высотам. Чем объясняется эта погрешность?

8. 26. Определить, во сколько раз возрастает плотность потока мощности полуволнового вибратора в экваториальной плоскости ($\theta=90^\circ$) и под зенитными углами $\theta=30, 60^\circ$ за счет направленности излучения этого вибратора.

8. 27. Определить сопротивление излучения заземленного вибратора, отнесенное к току в его основании и в пучности, если известно, что геометрическая высота вибратора 40 м, а длина волны 400 м.

8. 28.* Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной $l=\lambda=15$ м. Радиус провода вибратора 5 мм.

8. 29.* Определить входное сопротивление вертикального заземленного вибратора высотой 30 м при длине волны 700 м. Радиус провода вибратора 4 мм. Сопротивление потерь в антенне, отнесенное к току у основания антенны, 2 ом.

8. 30. Определить входное сопротивление и к. п. д. вертикального заземленного вибратора высотой 20 м при длине волны 500 м. Радиус провода вибратора 5 мм. Сопротивление потерь в антенне, отнесенное к току у основания антенны, 0,5 ом.

8. 31.* Какую геометрическую резонансную длину должен иметь полуволновый симметричный вибратор при длине волны 10 м и диаметре трубки, из которой изготовлен вибратор, 10 мм?

8. 32.* Определить входное сопротивление симметричного вибратора длиной 2 м при длине волны 10 м, радиусе провода вибратора 4 мм и сопротивлении потерь, отнесенном к клеммам вибратора, 3 ом.

8. 33. Имеются четвертьволновый заземленный и полуволновый симметричный вибраторы, возбуждаемые на одинаковой волне с равными токами в пучности. Доказать, что на одинаковом расстоянии от антенны напряженность поля четвертьволнового вибратора на идеально проводящей поверхности земли в два раза больше, чем полуволнового вибратора в экваториальной плоскости.

8. 34. Определить напряженность электрического поля полуволнового вибратора в экваториальной плоскости на расстоянии 100 км от него при излучаемой мощности 100 кВт в условиях идеальной радиопередачи.

8. 35.* Определить напряженность электрического поля четвертьволнового заземленного вибратора на расстоянии 250 км от вибратора при условии, что ток в основании антенны имеет амплитуду 10 а и проводимость земли идеальная.

8. 36.* Определить, пользуясь формулой идеальной радиопередачи, напряженность электрического поля симметричного вибратора длиной 10 см при длине волны 1 м, излучаемой мощности 10 кВт на расстоянии 10 км вдоль экваториальной плоскости вибратора.

8. 37. Синфазная многовибраторная антенна находится в свободном пространстве и состоит из 4 этажей по 8 полуволновых вибраторов в каждом. Амплитуда тока в пучности вибратора 2 а. Определить амплитуду напряженности электрического поля E_m на расстоянии 60 км от антенны в направлении ее максимального излучения.

8. 38. Два симметричных вибратора длиной $l=\lambda$ каждый расположены параллельно и удалены друг от друга на расстояние $\lambda/4$. Ток в них одинаков по амплитуде ($I_m=3$ а), но по фазе ток в первом вибраторе опережает ток во втором на 90° . Определить амплитуду напряженности поля на расстоянии 100 км от антенны в направлении от первого вибратора ко второму (E'_m) и наоборот (E''_m).

8. 39. Что называется резонансом в вибраторе. При каком соотношении между длиной волны и длиной симметричного и заземленного вибраторов наступает резонанс?

8. 40.* Рассчитать диаграмму направленности синфазной горизонтальной антенны в горизонтальной плоскости при наличии восьми полуволновых вибраторов в каждом этаже антенны и расстоянии между вибраторами $\lambda/2$.

8. 41.* Рассчитать и построить диаграмму направленности синфазной горизонтальной антенны, состоящей из четырех этажей виб-

раторов (влияние земли не учитывать). Расстояние между этажами $\lambda/2$.

8. 42. Определить сопротивление излучения антенны, состоящей из трех горизонтальных полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $a=\lambda/2$ и высоте $h=\lambda$ над землей (см. приложение IV).

8. 43. Почему в антеннах с бегущей волной тока не требуется рефлектор, а со стоячей волной тока однонаправленное излучение возможно только при наличии рефлектора?

8. 44.* Под какими углами φ к оси провода с бегущей волной тока длиной $l=3\lambda$ излучение провода максимально ($\varphi=\varphi_{\max}$) и равно нулю ($\varphi=\varphi_0$)?

8. 45.* Определить амплитуду напряженности электрического поля на расстоянии 30 км в направлении максимального излучения провода длиной $l=5\lambda$, в котором существует бегущая волна тока с амплитудой $I_m=0,5$ а.

8. 46.* Рассчитать диаграмму направленности в меридиональной плоскости провода длиной $l=4\lambda$ с бегущей волной тока.

8. 47.* Рассчитать и построить диаграмму направленности в горизонтальной плоскости прямоугольной площадки, которая имеет размер по горизонтали $a=10\lambda$ и возбуждается по всей поверхности током равной амплитуды и фазы.

8. 48. Какие размеры a и b должна иметь прямоугольная излучающая площадка при равномерном возбуждении ее по амплитуде и фазе, чтобы ширина главного лепестка диаграммы направленности площадки была равна $2\varphi'_a=2,5^\circ$ для горизонтальной плоскости и $2\varphi'_b=5^\circ$ для вертикальной плоскости?

8. 49. В каких направлениях излучение в горизонтальной плоскости отсутствует ($\varphi_a=\varphi_{a0}$) и в каких оно максимально ($\varphi_a=\varphi_{a\max}$), если излучателем служит прямоугольная площадка с размером по горизонтали $a=15$ см при синфазном и равномерном по амплитуде возбуждении на волне $\lambda=3$ см.

8. 50. Круглая излучающая площадка диаметром $d=20\lambda$ возбуждается равномерно и синфазно. Какова ширина главного лепестка диаграммы направленности площадки?

8. 51. Прямоугольная площадка, имеющая размеры $a=30$ см, $b=150$ см, при длине волны $\lambda=3$ см, возбуждается синфазно с амплитудой, которая изменяется синусоидально по размеру a и одинакова по размеру b . Определить эффективную поверхность и коэффициент направленного действия площадки.

8. 52. Определить э. д. с. $\mathcal{E}_a$, наводимую в полуволновом вибраторе электромагнитной волной с длиной волны $\lambda=10$ м и электрическим полем, напряженность которого $E=100$ мкв/м?

8. 53. Какую напряженность в точке приема должно иметь электрическое поле вертикально поляризованной волны, чтобы при $\lambda=20$ м индуцировать в вертикальном четвертьволновом вибраторе э. д. с., равную 5 мв?

ДЛИННОВОЛНОВЫЕ И СРЕДНЕВОЛНОВЫЕ АНТЕННЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Сопротивление потерь при рабочей длине волны λ и собственной длине волны антенны λ_0

$$R_{\pi} = A \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad (9.1)$$

где A — коэффициент, зависящий от качества заземления.

Индуктивность удлинительной катушки

$$L_{удл} = \frac{\lambda Z_{в.а}}{1880} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \right) \text{ мкГн}, \quad (9.2)$$

где $Z_{в.а}$ — волновое сопротивление вертикального вибратора в ом ;
 h — его высота в м .

Емкость укорачивающего конденсатора

$$C_{ук} = \frac{530\lambda}{Z_{в.а} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \right)} \text{ пФ}. \quad (9.3)$$

Действующая высота рамочной антенны

$$h_{\pi} = \frac{2\pi NS}{\lambda} \text{ м}, \quad (9.4)$$

где N — число витков рамки;

S — площадь, ограниченная контурами рамки.

Сопротивление излучения рамочной антенны

$$R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_{\pi}}{\lambda} \right)^2. \quad (9.5)$$

Резонансная длина волны λ_0 Т-образной антенны определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} h \right) = \frac{Z_{в.г}}{2Z_{в.в}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{l_{\Gamma}}{2} \right), \quad (9.6)$$

где h — высота антенны;

l_{Γ} — длина горизонтального провода антенны;

$Z_{в.в.}$, $Z_{в.г}$ — волновое сопротивление вертикального и горизонтального проводов антенны соответственно.

Размер l'_{Γ} вертикального вибратора, эквивалентного горизонтальной части Т-образной антенны, определяется выражением

$$\operatorname{ctg} \frac{2\pi l'_{\Gamma}}{\lambda_0} = \frac{Z_{в.г}}{2Z_{в.в}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{l_{\Gamma}}{2} \right). \quad (9.7)$$

Аналогично для Г-образной антенны имеют место следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} h\right) &= \frac{Z_{\text{в.г}}}{Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} l_{\text{г}}\right); \\ \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} l'_{\text{г}}\right) &= \frac{Z_{\text{в.г}}}{Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} l_{\text{г}}\right). \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

Амплитуды напряжения и тока в точках A, B, C Г-образной антенны (рис. 16) при амплитуде тока в основании I_{m0} соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} U_{mA} &= Z_{\text{в.в}} I_{m0} \operatorname{ctg} \beta l_{0e}; \quad I_{mA} = I_{m0}; \\ U_{mB} &= Z_{\text{в.в}} \frac{I_{m0} \cos \beta l'_{\text{г}}}{\sin \beta l_{0e}}; \quad I_{mB} = \frac{I_{m0} \sin \beta l'_{\text{г}}}{\sin \beta l_{0e}}; \\ U_{mC} &= \frac{Z_{\text{в.в}} I_{m0} \cos \beta l'_{\text{г}}}{\cos \beta l_{\text{г}} \sin \beta l_{0e}}; \quad I_{mC} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

Полная длина вертикального вибратора, эквивалентного Т-образной антенне,

$$l_{0e} = h + l'_{\text{г}}. \quad (9.10)$$

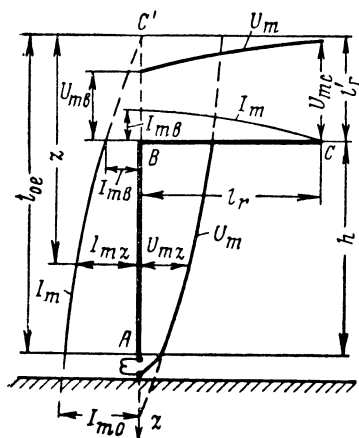


Рис. 16.

Статическая емкость n параллельных проводов радиусом r и длиной l каждый, которые расположены на высоте h в одной плоскости на расстоянии a один от другого,

$$C_{\text{а.г}} = \frac{l_{\text{г}} n}{2 \ln \left[\frac{2h}{r} \left(\frac{2h}{a} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right]}; \quad (9.11)$$

При вертикальном расположении проводов

$$C_{\text{а.в}} = \frac{hn}{2 \ln \left[\frac{h}{\sqrt{3}r} \left(\frac{h}{\sqrt{3}a} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right]}. \quad (9.12)$$

В формулах (9.11), (9.12) емкость и линейные размеры антенны выражены в см.

Амплитуда э. д. с., индуцируемой в рамке при амплитуде напряженности поля E_m :

$$\mathcal{E}_{ma} = h_{\text{д}} E_m \cos \varphi, \quad (9.13)$$

где φ — угол между направлением принимаемой волны и плоскостью рамки.

ЗАДАЧИ¹

9.1. Почему длинноволновым антеннам придают форму вертикальных заземленных проводов с сильно развитой горизонтальной частью? Какие функции выполняют в этой антенне вертикальные и горизонтальные провода?

9.2. Во сколько раз увеличится сопротивление излучения вертикального заземленного провода, длина которого значительно меньше длины волны λ , если антенну снабдить горизонтальной частью, при которой ток в вертикальном проводе распределится равномерно?

9.3. Как производится настройка в резонанс вертикального вибратора при удлинении и укорочении резонансной длины волны вибратора?

9.4. Определить к. п. д. антенны в виде вертикального заземленного вибратора высотой $h=60$ м при длине волны $\lambda=1200$ м, собственной длине волны $\lambda_0=900$ м и удовлетворительном заземлении ($A=3$ ом).

9.5. Определить мощность, подводимую к антенне в виде вертикального заземленного вибратора высотой $h=30$ м, если длина волны $\lambda=1500$ м, собственная длина волны антенны $\lambda_0=1000$ м, излучаемая мощность $P_z=100$ вт и заземление удовлетворительного качества ($A=2,5$ ом).

9.6. Определить индуктивность удлинительной катушки, предназначенной для настройки вертикального заземленного вибратора, имеющего высоту 150 м и волновое сопротивление 500 ом, в резонанс на волну $\lambda=800$ м.

9.7. Определить емкость укорачивающего конденсатора, необходимую для настройки вертикального заземленного вибратора, имеющего высоту 100 м и волновое сопротивление 450 ом, в резонанс на волну $\lambda=250$ м.

9.8. Вертикальный заземленный вибратор, имеющий высоту 100 м и волновое сопротивление 400 ом, настраивается в резонанс на рабочую волну 800 м. Требуется определить характер и величину элемента настройки вибратора.

9.9. Определить сопротивление потерь Г-образной антенны с длиной пути тока $l=100$ м при длине волны $\lambda=1200$ м и хорошем заземлении ($A=1$ ом). Волновой коэффициент $k=5$.

9.10. Определить к. п. д. Т-образной антенны с длиной пути тока $l=120$ м, действующей высотой $h_d=40$ м и хорошим заземлением ($A=2,5$ ом), если длина волны $\lambda=1600$ м, а волновой коэффициент $k=6$.

9.11. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в вертикальном заземленном вибраторе с удлинением и укорочением резонансной длины волны.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

9. 12. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в Г-образной антенне при удлинении и укорочении резонансной длины волны.

9. 13. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в Т-образной антенне при удлинении и укорочении резонансной длины волны.

9. 14.* Рассчитать резонансную длину волны и параметры элемента настройки Т-образной антенны, имеющей волновое сопротивление вертикального провода $Z_{в.в}=550$ ом, волновое сопротивление горизонтального провода $Z_{в.г}=400$ ом, высоту $h=50$ м и длину горизонтальной части $l_г=120$ м. Рабочая длина волны $\lambda=900$ м.

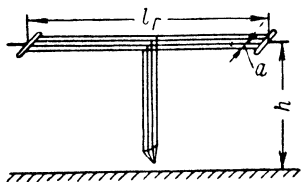


Рис. 17.

9. 15.* Определить статическую емкость и волновое сопротивление Г-образной антенны, в которой как горизонтальная часть, так и снижение состоят из четырех ($n=4$) параллельных проводов, расположенных в одной плоскости (рис. 17). Длина горизонтальной части $l_г=90$ м, высота антенны $h=60$ м. Радиус проводов $r=3$ мм. Расстояние между проводами $a=80$ см.

9. 16. Рассчитать статическую емкость и волновое сопротивление Г-образной антенны, имеющей длину горизонтальной части $l_г=80$ м, высоту $h=40$ м, радиус проводов $r=3$ мм, причем как горизонтальная часть, так и снижение антенны состоит из шести проводов, расположенных в одной плоскости на расстоянии $a=90$ см.

9. 17.* Определить амплитудные значения напряжения и тока в точках А, В, С Г-образной антенны (см. рис. 16), имеющей волновые сопротивления $Z_{в.г}=450$ ом, $Z_{в.в}=550$ ом, длину горизонтальной части $l_г=80$ м и высоту $h=60$ м, если длина волны $\lambda=720$ м и амплитуда тока в основании антенны $I_{m0}=10$ а.

9. 18. Определить амплитудные значения напряжения и тока в характерных точках Т-образной антенны, данные которой приведены в задаче 9. 15. В основании антенны амплитуда тока равна 5 а.

9. 19.* Какое максимальное напряжение может быть подведено к входным клеммам антенны, рассчитанной по данным предыдущей задачи, если эта антенна возбуждается амплитудно-модулированными колебаниями с коэффициентом модуляции $m=1$? Критическое значение напряжения в антенне составляет $U_{mкр}=100$ кв.

9. 20. Доказать, что действующая высота антенны с верхней частью выражается формулой

$$h_x = \frac{2 \sin \left[\beta \left(l_{0e} - \frac{h}{2} \right) \right] \sin \frac{\beta h}{2}}{\beta \sin \beta l_{0e}},$$

где l_{0e} — высота эквивалентного вертикального вибратора,
 h — высота антенны.

9. 21.* Определить коэффициент полезного действия Г-образной антенны с высотой эквивалентного вибратора $l_{0e}=177,5$ м и высотой антенны $h=50$ м при наличии удовлетворительного заземления ($A=3$ ом), собственной длине волны $\lambda_0=639$ м и длине волны $\lambda=900$ м.

9. 22. Рамочная антенна состоит из 30 витков провода, образующих прямоугольную рамку со сторонами $m=40$ см и $h=1$ м, принимает радиоволны длиной $\lambda=400$ м. Определить действующую высоту и сопротивление излучения антенны.

9. 23. По данным задачи 9. 22 определить амплитуду э. д. с., индуцируемой в рамочной антенне, если плоскость рамки совпадает с направлением приема вертикально поляризованных волн, магнитное поле которых имеет амплитуду напряженности $H_m=10^{-8}$ а/м.

9. 24. Какой будет амплитуда э. д. с. в рамочной антенне (см. задачу 9. 23), если плоскость ее расположена относительно направления принимаемой волны под углом $\varphi=30^\circ$.

9. 25. Определить сопротивление излучения круглой рамочной антенны, имеющей диаметр 40 см и состоящей из 20 витков провода. Длина волны равна 800 м. Какова амплитуда э. д. с., индуцируемой в рамке, если волна поляризована вертикально и имеет амплитуду напряженности электрического поля 10 мв/м?

9. 26. Какие необходимы дополнения к рамочной антенне, чтобы получить диаграмму направленности в виде кардиоиды? Изобразите графически такую диаграмму.

Глава X

КОРОТКОВОЛНОВЫЕ АНТЕННЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Диапазон волн, в котором может быть использован симметричный вибратор длиной l , находится в пределах

$$0,8l < \lambda < 4l. \quad (10. 1)$$

Угол наклона первого (относительно земной поверхности) максимума диаграммы направленности $\delta_{\max}$ вибратора определяется выражением

$$\sin \delta_{\max} = \lambda/4h. \quad (10. 2)$$

Максимальная дальность связи R , обеспечиваемая горизонтальным вибратором, расположенным на высоте h над землей, при отражении радиоволн от ионизированного слоя высотой H будет

$$R = \frac{8Hh \sqrt{1 - \lambda^2/16h^2}}{\lambda}. \quad (10. 3)$$

Входное сопротивление синфазной горизонтальной антенны, состоящей из полуволновых вибраторов,

$$R_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{в.а}}^2}{R_{\Sigma \text{а}}}, \quad (10.4)$$

где $R_{\Sigma \text{а}}$ — сопротивление излучения всей антенны, отнесенное к току в пучности.

При параллельном питании полуволнового вибратора для согласования фидер с волновым сопротивлением $Z_{\text{в.ф}}$ подключается к точкам вибратора, удаленным от его середины на расстояние x , согласно равенству

$$\frac{Z_{\text{в.а}}^2}{73,1} \sin^2 \beta x = Z_{\text{в.ф}}. \quad (10.5)$$

Эквивалентный радиус диполя Надененко r_3 , т. е. радиус сплошного вибратора, имеющего такое же волновое сопротивление, как диполь Надененко, равен

$$r_3 = r \sqrt[n]{\frac{nr'}{r}}, \quad (10.6)$$

где r' — радиус проводов, расположенных по образующим цилиндров диполя;

n — число проводов в цилиндре;

r — радиус цилиндрической поверхности.

Волновое сопротивление диполя Надененко, имеющего длину l и эквивалентный радиус r_3 ,

$$Z_{\text{в.а}} = 120 \left(\ln \frac{l}{2r_3} - 1 \right). \quad (10.7)$$

В ромбической антенне острый угол ромба, сторона которого l , равен $2\varphi_{\text{max}}$, причем

$$\cos \varphi_{\text{max}} = 1 - \frac{\lambda}{2l}. \quad (10.8)$$

Высота h ромбической антенны связана с оптимальным углом наклона луча δ_{max} зависимостью

$$h \approx \frac{\lambda_0}{4 \sin \delta_{\text{max}}}, \quad (10.9)$$

где λ_0 — длина волны, при которой антенна имеет максимальный коэффициент усиления.

Оптимальный коэффициент замедления волны в антеннах бегущих волн

$$k = 1 + \frac{\lambda}{2l_a}. \quad (10.10)$$

Коэффициент замедления волны

$$k = \frac{c}{v_{\phi}}, \quad (10.11)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ — скорость света в м/сек;
 v_{ϕ} — фазовая скорость волны в данной среде.

ЗАДАЧИ¹

10.1. Почему коротковолновые антенны желательно иметь диапозонными?

10.2. Почему важно отсутствие обратного излучения и боковых лепестков в диаграммах направленности коротковолновых антенн?

10.3. Из каких соображений выбирается длина и высота подвеса симметричного горизонтального вибратора (ВГ)?

10.4.* Какую длину должен иметь тонкий горизонтальный вибратор ВГ для работы в диапазоне волн $\lambda_{\min} = 20$ м, $\lambda_{\max} = 50$ м?

10.5.* Тонкий вибратор ВГ имеет длину 15 м. В каком диапазоне волн может работать этот вибратор?

10.6.* Определить угол наклона луча $\delta_{\max}$ и дальность связи R в случае применения вибратора ВГ, расположенного на высоте $h = \frac{\lambda}{2}$, при отражении волн от ионизированного слоя, находящегося на высоте $H = 300$ км.

10.7. На какой высоте h должен быть подвешен вибратор ВГ, чтобы при отражении электромагнитной волны от ионизированного слоя высотой $H = 350$ км и длине волны $\lambda = 40$ м обеспечить связь на расстояние $R = 1000$ км?

10.8. На каком расстоянии x от середины вибратора ВГ, волновое сопротивление которого равно 570 ом, следует включить концы двухпроводного фидера, имеющего волновое сопротивление 600 ом, если согласование вибратора с фидером производится по схеме параллельного питания на волне $\lambda = 30$ м?

10.9. Вибратор СГ изготовлен из бронзового провода диаметром 4 мм. Длина волны равна 40 м. На каком расстоянии x от середины вибратора следует подключить концы двухпроводного фидера с волновым сопротивлением 600 ом для согласования его с вибратором по схеме параллельного питания?

10.10.* Какое должно быть установлено соотношение между радиусом вибратора и длиной волны, чтобы волновое сопротивление вибратора было равно 300 ом?

10.11.* Имеется диполь Надененко ВГД $\frac{20}{15}$ 2, стороны которого образованы восемью проводами диаметром 3 мм. Определить волновое сопротивление диполя.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

10. 12. Диполь Надененко длиной 30 м изготовлен из шести проводов радиусом 1,5 мм, расположенных по образующим цилиндра радиусом 0,75 м. Каково волновое сопротивление диполя?

10. 13.* Определить среднее значение сопротивления излучения R_{Σ} , приходящегося на один вибратор антенны $СГ \frac{2}{4} P$

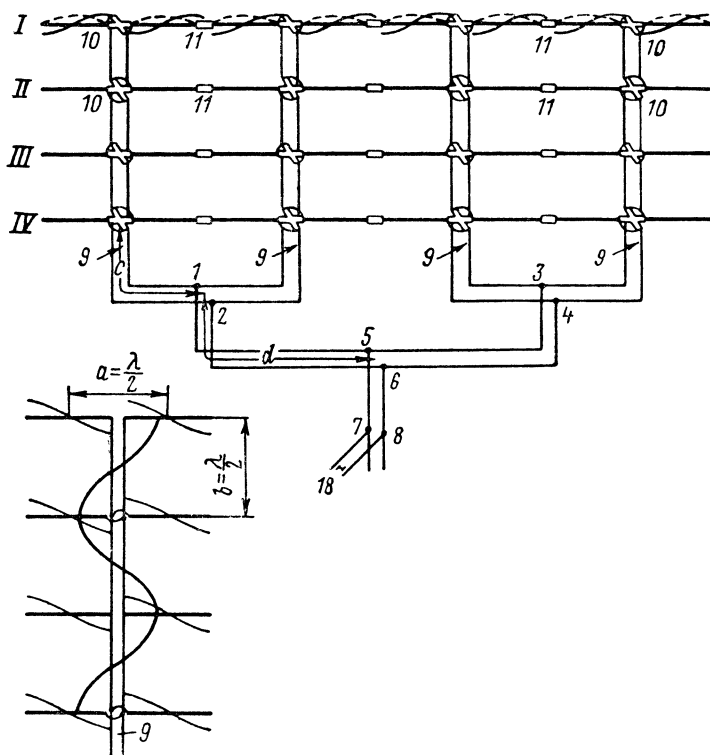


Рис. 18.

($R_{\Sigma a} = 1117 \text{ ом}$). Почему каждое из этих сопротивлений больше, чем для одиночного вибратора?

10. 14. Определить входное сопротивление антенн $СГ \frac{2}{4} P$ ($R_{\Sigma a} = 1117 \text{ ом}$) и $СГ \frac{2}{8} P$ ($R_{\Sigma a} = 2300 \text{ ом}$), полагая, что волновое сопротивление одного вибратора $Z_{в.а} = 1000 \text{ ом}$.

10. 15.* Рассчитать коэффициенты стоячих волн на всех участках фидеров, питающих антенну $СГ \frac{4}{8} P$ (рис. 18), при условии, что

волновое сопротивление фидера $Z_{в.ф}=600 \text{ ом}$, а волновое сопротивление вибраторов $Z_{в.а}=1000 \text{ ом}$.

Примечание. Сопротивление излучения всей антенны R_{Σ} дано в приложении V.

10.16. Определить $k_{с.в}$ на всех участках фидеров, питающих антенну СГ $\frac{2}{4} R$, при условии, что волновое сопротивление фидера $Z_{в.ф}=600 \text{ ом}$, а волновое сопротивление вибраторов $Z_{в.а}=1000 \text{ ом}$.

10.17.* Мощность, излучаемая антенной СГ $\frac{2}{4} R$, равна 10 квт.

Определить амплитуды токов и напряжений вибраторов в пучностях, полагая, что волновое сопротивление вибратора равно 1000 ом.

10.18. Амплитуда напряжения в пучности одного вибратора антенны СГ $\frac{4}{8} R$ равна 2 кв. Определить мощность, излучаемую антенной, полагая, что волновое сопротивление вибратора 1000 ом.

10.19. Чем объясняется, что антенны СГ не обладают диапозонными свойствами?

10.20. Чем достигается равенство токов (по амплитуде) и их синфазность в вибраторах антенны кратных волн (КГ) при работе антенны в широком диапазоне волн?

10.21. Как осуществляется согласование антенны КГ с фидером при работе без перестройки на двух кратных и на двух произвольно выбранных волнах?

10.22. Почему ромбическая антенна наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диапозонным антеннам? В чем преимущества и недостатки простых ромбических антенн?

10.23. Расшифруйте следующие обозначения: $РГ \frac{65}{4} 1$; $РГ \frac{57}{1,7} 0,5$; $РГД \frac{70}{6} 1,25$.

10.24.* Определить оптимальные углы ромба при длине каждой стороны его $l=2\lambda$; 3λ ; 4λ ; 5λ ; 6λ ; 8λ ; 10λ .

10.25. Определить высоту h ромбической антенны в длинах волн при оптимальном угле наклона луча $\delta=15^\circ$.

10.26. Определить высоту h ромбической антенны в длинах волн при оптимальном угле наклона луча $\delta=30^\circ$.

10.27.* Выбрать стандартную ромбическую антенну для связи на расстоянии 2000 км.

10.28.* Определить длину стальной линии, которая используется в качестве поглощающего сопротивления ромбической антенны, излучающей мощность $P_{\Sigma}=40 \text{ квт}$ при к. п. д. антенны $\eta_a=65\%$ и максимальной длине волны $\lambda_{\max}=60 \text{ м}$, считая, что в линии поглощается 99% поступающей в нее мощности.

10.29. Какая мощность P_R рассеивается на поглощающем сопротивлении передающей ромбической антенны, к которой подводится мощность $P=35 \text{ кВт}$ и к. п. д. которой равен 60%? Потерями на нагрев проводов ромба пренебречь.

10.30.* Определить фазовую скорость v_ϕ , которую целесообразно установить в линии антенны бегущей волны, имеющей длину 91,2 м и работающей в диапазоне волн $\lambda=14+25 \text{ м}$.

10.31. При какой фазовой скорости в собирательной линии антенна бегущей волны имеет максимальный коэффициент усиления, если длина собирательной линии равна 100 м, а длина волны 25 м?

10.32.* Рассчитать фазовую скорость волн в собирательной линии антенны бегущей волны Б $\frac{39}{4} \cdot \frac{4}{2,4} \cdot 16$, полагая, что волновое сопротивление линии при отключенных вибраторах равно 600 ом.

10.33. Рассчитать коэффициент замедления и фазовую скорость волн в собирательной линии антенны Б $\frac{24}{8} \cdot \frac{15}{3,96} \cdot 16$, полагая, что волновое сопротивление линии без шунтирующих элементов равно 600 ом.

Глава XI

ВОЛНОВОДЫ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Критическая длина волны волн типа H_{mn} (TE_{mn}) и E_{mn} (TM_{mn}). в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (11.1)$$

где a и b — стороны поперечного сечения волновода.

Фазовая скорость в волноводе

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (11.2)$$

где $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$ — скорость света;

λ — рабочая длина волны в свободном пространстве.

Групповая скорость в волноводе

$$v_{гр} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \quad (11.3)$$

Волновое сопротивление волновода, вычисленное через напряженности полей для волн типа Н(ТЕ):

$$Z_{\text{в}} = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (11.4)$$

а для волн типа Е (ТМ)

$$Z_{\text{в}} = 377 \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}. \quad (11.5)$$

Эквивалентное (волновое) сопротивление волновода, вычисленное через напряжения и токи для волны Н₁₀:

$$Z'_{\text{в}} = \frac{\pi b}{2a} \cdot \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (11.6)$$

Максимальная мощность, допустимая для передачи по волноводу,

$$P_{\text{пред}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-4} E_{\text{проб}}^2 ab}{k_{\text{с.в}}} \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}, \quad (11.7)$$

где $E_{\text{проб}}$ — пробивная напряженность электрического поля;

$k_{\text{с.в}}$ — коэффициент стоячей волны в продольном направлении.

Коэффициент затухания при волне Н₁₀ в прямоугольном волноводе

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\gamma}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{377b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}} \text{ нпн/м}, \quad (11.8)$$

где μ — магнитная проницаемость стенок волновода в гн/м;

γ — удельная проводимость внутренней поверхности в 1/ом · м;

f — частота передаваемых волн в гц.

Коэффициент затухания в круглом волноводе при волне Е₀₁

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\gamma}}}{60\pi D \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (11.9)$$

где D — диаметр внутренней поверхности волновода;

$$\lambda_{\text{кр}} = 2,61 \frac{D}{2}.$$

В случае возбуждения волны Н₁₀ в прямоугольном волноводе по схеме, приведенной на рис. 19, реактивная составляющая входного сопротивления возбуждающего штыря должна быть равна нулю согласно равенству

$$\frac{h_{\text{а}}^2 Z_{\text{в}}}{ab} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} y_0 \right) \sin(2\beta_{\text{в}} l_2) + X_{\text{в}} = 0, \quad (11.10)$$

а активная составляющая входного сопротивления штыря должна быть равна волновому сопротивлению коаксиального фидера $Z_{в.ф}$:

$$\frac{2h_d^2}{ab} Z_{в} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} y_0 \right) \sin(\beta_{в} l_2) = Z_{в.ф}. \quad (11.11)$$

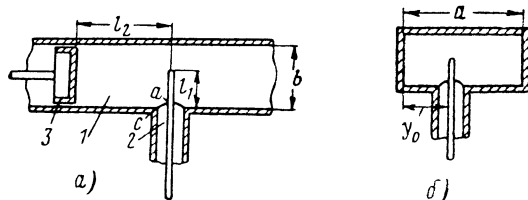


Рис. 19.

Обозначения в формулах (11.10), (11.11): h_d — действующая высота штыря; $Z_{в}$ — волновое сопротивление волновода; размеры a , b , l_1 , l_2 , y_0 показаны на рис. 19; $X_{в}$ — входное реактивное сопротивление собственно вибратора.

Резонансная длина волны прямоугольного объемного резонатора со сторонами a , b , l , при волнах H_{mnp} (TE_{mnp}) или $E_{mnp} \times \times (TM_{mnp})$ равна

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}}. \quad (11.12)$$

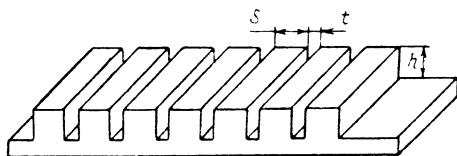


Рис. 20.

Фазовая скорость волн в замедляющей структуре при $t \ll \lambda$ (рис. 20) равна

$$v_{\Phi} = \frac{c}{\sqrt{1 + \left(\frac{t}{s+t}\right)^2 \operatorname{tg}^2 \beta h}}, \quad (11.13)$$

где h — высота выступов;
 s — ширина выступов;
 t — зазор между выступами.

ЗАДАЧИ¹

11.1.* Если размер a поперечного сечения прямоугольного волновода больше, чем $\lambda/2$, то такой волновод можно представить в виде двухпроводной линии² AB (рис. 21, a), к которой примыкают с обеих сторон короткозамкнутые перемычки длиной $\lambda/4$. Будут ли эти перемычки препятствовать передаче волн напряжения и тока в продольном направлении (по линии AB)?

11.2.* Допустим, что размер a прямоугольного волновода такой же, как указано в задаче 11.1, но линия AB находится на произ-

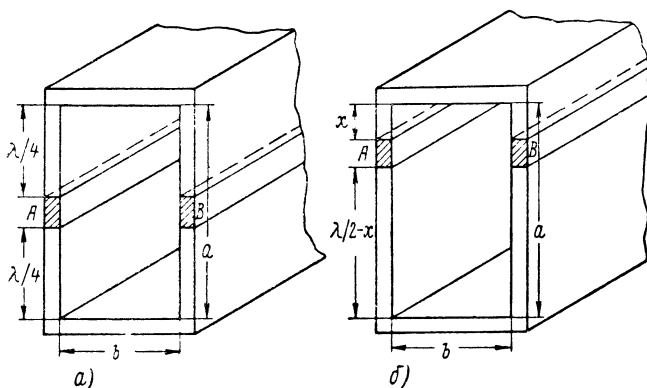


Рис. 21.

вольном расстоянии x от одной из узких стенок волновода (рис. 21, b). Будут ли в этом случае короткозамкнутые перемычки препятствовать передаче волн по линии AB ?

11.3. Прямоугольный волновод согласован с нагрузкой. Каким волнам (бегущим или стоячим) соответствует распределение напряжения³ между стенками волновода в продольных и поперечных сечениях его, а также распределение поверхностной плотности продольного и поперечного токов проводимости.

11.4. На рис. 22, a показано 9 сечений прямоугольного волновода, отстоящих друг от друга на $1/8$ волноводной длины волны. Изобразить в масштабе кривые изменения напряжения в поперечных сечениях 1—9, а также в продольных сечениях на уровнях

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

² Аналогия между волноводом и двухпроводной линией не может быть применена к любому типу волн. В данном случае имеется в виду волна H_{10} , для которой эта аналогия справедлива.

³ В общем случае понятия напряжения и тока, в их обычном смысле, не применимы к волноводу. Здесь же это возможно, так как речь идет о поперечно электрической волне H_{10} , в которой электрическое поле потенциально. Под напряжением в волноводу будем понимать разность потенциалов на концах соответствующей электрической силовой линии, а вместо распределения тока лучше говорить о распределении поверхностной плотности тока.

CD , EF , если на уровне AB напряжение распределяется по кривой d .

11.5. На рис. 22, a показана кривая распределения плотности продольного тока проводимости и направление этого тока в сечении 5. Построить аналогичные кривые (в масштабе) для остальных сечений волновода.

11.6. На рис. 22, a показана кривая распределения плотности поперечного тока и его направление в сечении 3 волновода (вели-

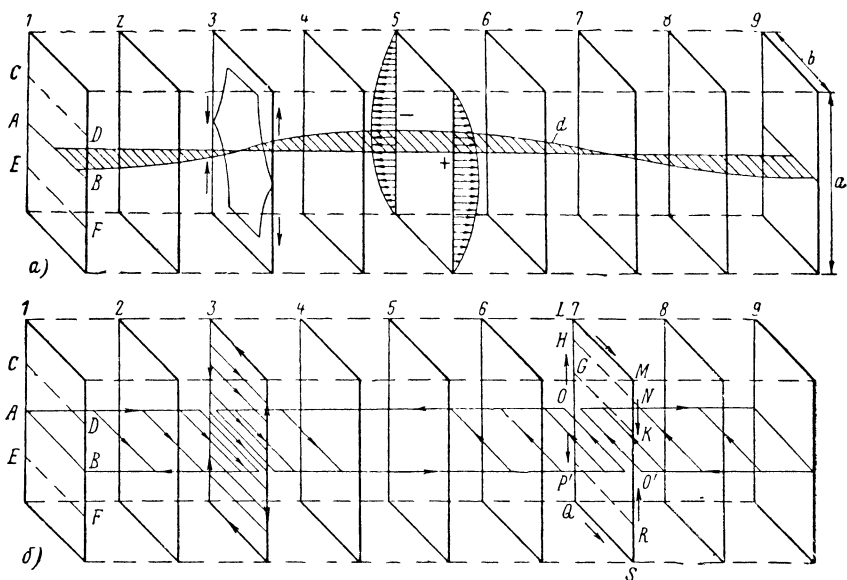


Рис. 22.

чина тока пропорциональна отклонению кривой от контура сечения). Сделать аналогичные построения для остальных поперечных сечений.

11.7. На рис. 22, $б$ показаны линии токов смещения и продольного тока проводимости на уровне AB и токов смещения и поперечного тока проводимости в течении 3. Сделать аналогичные построения для уровней CD , EF и остальных поперечных сечений.

11.8. Какая зависимость существует между поперечным током проводимости на уровнях GK , HN , LM , PR , QS и токами смещения в данном поперечном сечении волновода (рис. 22, $б$).

11.9. Какая зависимость имеется между продольным током проводимости в сечениях 4, 5, 6 и токами смещения в данном поперечном сечении волновода (рис. 22, $б$)?

11.10. На рис. 23 показано изменение напряжения в сечении 5 и плотности продольного тока проводимости (стрелки указывают

его направление) круглого волновода¹. Изобразить распределение этих же величин по другим поперечным сечениям 1—4, 6—9, отстоящим друг от друга на $\frac{1}{8}$ волноводной длины волны.

11.11. Изобразить с помощью силовых линий электрическое поле в поперечных сечениях волновода, показанного на рис. 22.

11.12. Почему о напряженности магнитного поля в волноводе можно судить по распределению токов проводимости, тогда как возбуждается это поле током смещения?

11.13. Изобразить магнитное поле прямоугольного волновода по результатам решения задач 11.5 и 11.6.

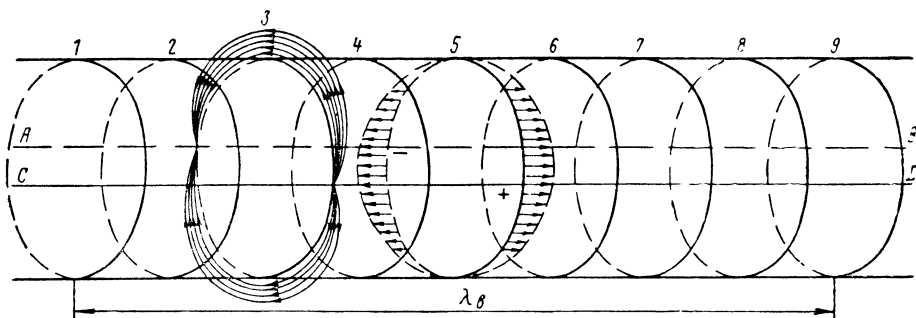


Рис. 23.

11.14. Изобразить электрическое поле в круглом волноводе по распределению напряжения согласно задаче 11.10.

11.15. Изобразить магнитное поле в круглом волноводе на основании распределения продольного и поперечного токов (см. задачу 11.10).

11.16. Почему в волноводе не могут распространяться волны ТЕМ?

11.17. Что означает наименование волн TE_{01} , TE_{10} , TE_{23} , H_{01} , H_{12} , TM_{11} и E_{23} применительно к прямоугольному волноводу.

11.18. Что означает наименование волн TE_{01} , TE_{11} , H_{01} , H_{21} , TM_{01} , E_{01} применительно к круглому волноводу?

11.19. Изобразите при помощи силовых линий электрические и магнитные поля волн H_{10} , H_{20} , H_{11} и H_{21} в прямоугольном волноводе.

11.20. Изобразите электрические и магнитные поля волн H_{01} , E_{01} и H_{11} в круглом волноводе.

11.21. Выразить через размеры a , b поперечного сечения прямоугольного волновода критическую длину волны для волн типа H_{10} , H_{20} , H_{11} , E_{11} и H_{21} .

¹ Здесь имеется в виду поперечно-электрическая волна H_{11} , в которой электрическое поле потенциально.

11.22. Имеется стандартный прямоугольный волновод с размерами $a=4,8$ см, $b=2,4$ см. Определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$ для волн типа H_{10} , H_{20} , H_{01} , H_{21} .

11.23. Определить критическую длину волны в прямоугольном волноводе с размерами $a=4,8$ см; $b=2,4$ см для волн E_{11} , E_{12} , H_{12} и H_{11} .

11.24. Почему при волнах H в волноводе ток проводимости имеет и продольную и поперечную составляющие, а при волнах — E только продольную?

11.25. Какой минимальный диаметр D_{min} должен иметь круглый волновод для передачи электромагнитных колебаний с частотой 10 ГГц ($10\,000$ МГц) при следующих типах волн: H_{11} , E_{01} , H_{21} , H_{01} и H_{31} ?

11.26. Почему при волнах TEM фазовая, групповая скорости и скорость света равны между собой, а в волноводе они различны?

11.27. Изобразите на одном рисунке лучи падающих и отраженных волн и фронты этих волн между стенками прямоугольного волновода. Покажите здесь же длины волн в воздухе и в волноводе.

11.28. Прямоугольный волновод МЭК-100¹ имеет поперечные размеры: $a=22,86$ мм, $b=10,16$ мм; по нему передается волна типа H_{10} с частотой $f=10\,000$ МГц. Требуется определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$, фазовую $v_{ф}$ и групповую $v_{гр}$ скорости, а также длину волны в волноводе $\lambda_{в}$.

11.29. 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 ($40\,000$ МГц). Определить критическую длину волны $\lambda_{кр}$, фазовую $v_{ф}$ и групповую $v_{гр}$ скорости, а также длину волны в волноводе $\lambda_{в}$.

11.30. Определить волновое сопротивление $Z_{в}$ прямоугольного волновода МЭК-40 ($a=58,17$ мм, $b=29,083$ мм), а также эквивалентное сопротивление, определяемое через напряжения и токи ($Z'_{в}$), при условии, что по волноводу передается волна H_{10} с частотой 4 ГГц ($4\,000$ МГц).

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

11.32.* Определить размеры поперечного сечения a_c , b_c и длину четвертьволнового трансформатора, согласующего два отрезка прямоугольного волновода, из которых один отрезок имеет размеры $a=19,05$ мм; $b_1=9,53$ мм, а другой $a_2=a_1=19,05$ мм; $b_2=7,08$ мм (рис. 24).

¹ 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.

По волноводу проходит волна типа H_{10} с частотой 12 Гц.

11.33. 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 Гц.

11.34.* Определить длину волны, волновое сопротивление и коэффициент затухания в медном ($\gamma = 5,8 \cdot 10^7$ 1/ом·м) круглом волновод с внутренним диаметром 25,4 мм при распространении в нем волны типа E_{01} с длиной волны в свободном пространстве $\lambda = 3$ см.

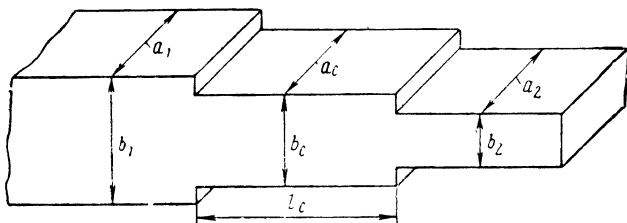


Рис. 24.

11.35.* 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 $k_{с.в} = 2,04$. Рассчитать также коэффициент затухания в волновод, если бы последний был изготовлен из меди, латуни, алюминия или покрыт серебром.

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

11.36. Вычислить предельную и допустимую мощности для прямоугольного волновода МЭК-100 ($a = 22,86$ мм и $b = 10,16$ мм) при распространении в нем волны H_{10} с частотой 9,84 Гц. Расчет допустимой мощности произвести применительно к самолетной аппаратуре и высоте полета $h = 15$ км (см. табл. 2).

11.37. Вычислить коэффициент затухания волны в волновод по данным задачи 11.36.

11.38. Определить критическую длину волны в круглом волновод, в котором распространяются волны H_{11} с частотой 10 Гц при длине волны в волновод 4,5 см.

11.39.* Вычислить пробивную и допустимую мощности и коэффициент затухания волн в прямоугольном медном волновод с внутренними размерами $a = 23$ мм, $b = 10$ мм на максимальной волне рабочего диапазона $\lambda_{max} = 4,1$ см. Расчет произвести для двух случаев: а) волновод эксплуатируется на земле; б) волновод эксплуатируется в воздухе на высоте 12 км (табл. 2). В обоих случаях $k_{с.в} = 1$.

11.40.* 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; $\lambda_{в}=3,97$ см; $Z_{в}=499,3$ ом), если известно место расположения минимума поперечной составляющей напряженности электрического поля и что $k_{с.в}=2,4$.

Таблица 2

h в см	0	3	6	9	12	15
$P_{доп}$ в % от $P_{пред}$	100	50	27	13	5	2

11.41. Определить место включения и глубину погружения индуктивной согласующей диафрагмы в волновод с внутренними размерами $a=10$ мм, $b=23$ 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.

11.42.* Прямоугольный волновод с внутренними размерами $a=23$ мм, $b=10$ мм, возбуждается на волне типа H_{10} вибратором, к которому подводится питание через коаксиальную линию, имеющую волновое сопротивление $Z_{в.ф}=50$ ом (см. рис. 19). 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.

11.43.* Определить резонансную длину волны в прямоугольном объемном резонаторе, имеющем размеры $a=23$ мм, $b=10$ мм, $l=23$ мм при колебаниях волны типа H_{101} .

11.44. Определить резонансную длину волны объемного резонатора, который имеет форму куба со стороной 7,07 см и возбуждается на волне типа H_{101} .

11.45. На каких волнах типа ТЕМ наблюдается параллельный резонанс в коаксиальных резонаторах длиной l , которые замкнуты накоротко на одном конце и разомкнуты на другом?

11.46. При какой длине l коаксиального резонатора, короткозамкнутого на обоих концах, наступает резонанс?

11.47. Имеется коаксиальный резонатор с волновым сопротивлением $Z_{в}=75$ ом, нагруженный на емкость $C=5$ нф. При какой длине резонатора l наблюдается резонанс на основной волне $\lambda=30$ см?

11.48. Определить коэффициент замедления k и фазовую скорость $v_{ф}$ в структуре, показанной на рис. 20, при высоте выступов $h=5$ мм, ширине выступов $s=3$ мм, зазоре между ними $t=1$ мм и длине волны $\lambda=3,2$ см.

АНТЕННЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Антенна типа «волновой канал» с общей длиной l_a имеет коэффициент направленного действия

$$D = k_1 \frac{l_a}{\lambda}, \quad (12.1)$$

где $k_1 = 5 \div 10$ коэффициент, зависящий от числа директоров.

Коэффициент направленного действия антенн бегущих волн с оптимальной активной длиной l_a

$$D \approx (7 \div 8) \frac{l_a}{\lambda}. \quad (12.2)$$

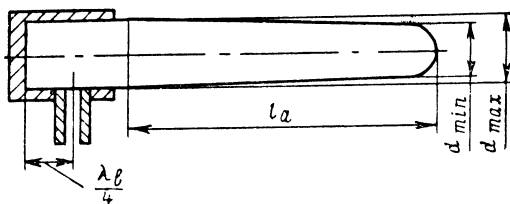


Рис. 25.

Максимальный и минимальный диаметры стержня диэлектрической антенны (рис. 25)

$$\begin{aligned} d_{\max} &= 0,565\lambda / \sqrt{\epsilon - 1}; \\ d_{\min} &= 0,355\lambda / \sqrt{\epsilon - 1}, \end{aligned} \quad (12.3)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня.

Для цилиндрической спиральной антенны (рис. 26) с длиной спирали по ее оси l_a , длиной одного витка l_c :

ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 по напряженности поля

$$2\varphi' = \left(\frac{52}{\frac{l_c}{\lambda} \sqrt{\frac{l_a}{\lambda}}} \right)^\circ; \quad (12.4)$$

коэффициент направленного действия

$$D = 15 \left(\frac{l_c}{\lambda} \right)^2 \frac{l_a}{\lambda}; \quad (12.5)$$

входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{l_c}{\lambda} \text{ ом}. \quad (12.6)$$

Коэффициент усиления синфазной щелевой антенны (рис. 27)

$$G \approx 3,2 n, \quad (12.7)$$

где n — число щелей в антенне.

Для Н-плоскостного рупора оптимальных размеров (рис. 28, а):
соотношение между длиной l и шириной раскрыва a'

$$l = \frac{(a')^2}{3,3\lambda}; \quad (12.8)$$

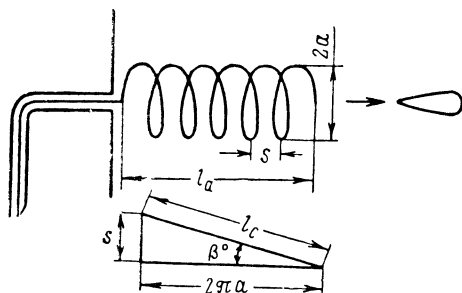


Рис. 26.

ширина диаграммы направленности в E и H плоскостях

$$2\varphi'_E = \left(51 \frac{\lambda}{b'}\right)^\circ; \quad 2\varphi'_H = \left(80 \frac{\lambda}{a'}\right)^\circ;$$

коэффициент усиления

$$G \approx 7,9 \frac{a' b'}{\lambda^2}.$$

(12.9)

Для E -плоскостного рупора оптимальных размеров (рис. 28, б):

$$l = \frac{(b')^2}{2,1\lambda};$$

$$2\varphi'_E = \left(53 \frac{\lambda}{b'}\right)^\circ; \quad 2\varphi'_H = \left(68 \frac{\lambda}{a'}\right)^\circ;$$

$$G = 8 \frac{a' b'}{\lambda^2}.$$

(12.10)

Для пирамидального рупора оптимальных размеров (рис. 28, в)

$$b' = 0,8a'; \quad l = 0,3 \frac{(a')^2}{\lambda};$$

$$2\varphi'_E = \left(53 \frac{\lambda}{b'}\right)^\circ; \quad 2\varphi'_H = \left(80 \frac{\lambda}{a'}\right)^\circ;$$

$$G \approx 6 \frac{a' b'}{\lambda^2}.$$

(12.11)

Для конического рупора оптимальных размеров (рис. 28, з):

$$l = \frac{0,3 \cos \theta}{1 - \cos \theta} \lambda; \quad d = \frac{0,6 \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta} \lambda, \quad (12.12)$$

$$2\varphi'_E = \left(60 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ; \quad 2\varphi'_H \approx \left(70 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ; \quad G \approx 5,1 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^\circ. \quad (12.13)$$

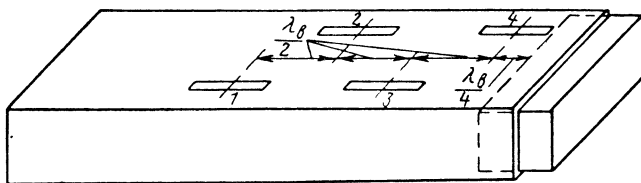


Рис. 27.

Толщина незонированной диэлектрической линзы (рис. 29, а) равна

$$m = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{d^2}{4(n^2-1)}}, \quad (12.14)$$

где f — фокусное расстояние;
 n — показатель преломления линзы;
 d — диаметр (длина) линзы.

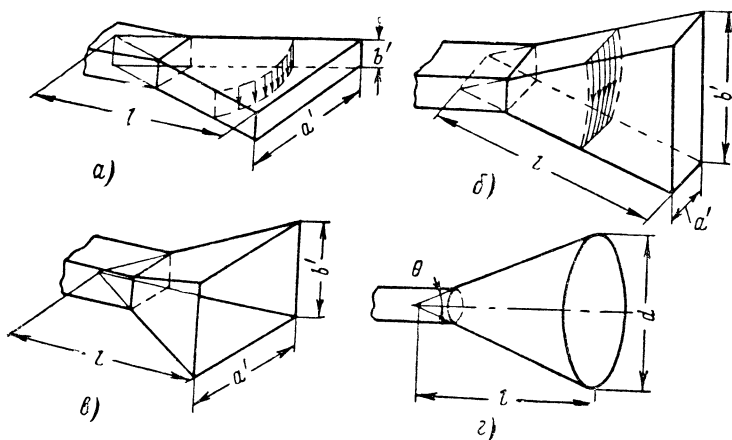


Рис. 28.

Ширина ступеньки зонированной диэлектрической линзы (рис. 29, б) при длине волны λ равна

$$m' = \frac{\lambda}{n-1}. \quad (12.15)$$

Полоса пропускания зонированной диэлектрической линзы

$$\Delta f_{\text{пр}} = 0,5 \frac{f_0}{k}, \quad (12.16)$$

где f_0 — несущая частота радиосигнала;
 k — число зон в линзе.

Профиль ускоряющей линзы определяется уравнением

$$(1 - n^2)x^2 - (1 - n)2fx + y^2 = 0, \quad (12.17)$$

где x, y — прямоугольные координаты точек преломляющей поверхности линзы (начало координат находится на вершине линзы).

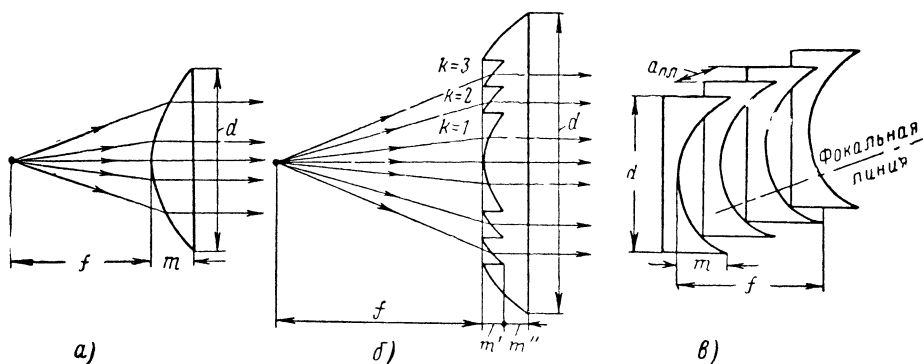


Рис. 29.

Толщина ускоряющей незонированной металлопластинчатой линзы (рис. 29, в)

$$m'' = \frac{f}{1 + n} - \sqrt{\left(\frac{f}{1 + n}\right)^2 - \frac{d^2}{4(1 - n^2)}}. \quad (12.18)$$

Коэффициент преломления ускоряющей металлопластинчатой линзы

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_{\text{пл}}}\right)^2}, \quad (12.19)$$

где $a_{\text{пл}}$ — расстояние между соседними пластинами.

Коэффициент преломления линзы из искусственного диэлектрика с металлическими элементами в виде дисков или лент соответственно равен

$$n = \sqrt{1 + \frac{16}{3}NR^3}; \quad (12.20)$$

$$n = \sqrt{1 + \frac{\pi a^2 N}{4}}, \quad (12.21)$$

где N — число дисков в единице объема или число лент на единице площади;

R — радиус диска;

a — ширина ленты.

Между углом раскрыва ψ , диаметром d и фокусным расстоянием f антенны в виде параболоида вращения имеется зависимость

$$\operatorname{ctg} \psi = \frac{4f}{d}. \quad (12.22)$$

Коэффициент направленного действия антенны

$$D = \sqrt{D_E D_H}, \quad (12.23)$$

где D_E , D_H — коэффициенты направленного действия той же антенны соответственно в плоскостях E и H .

ЗАДАЧИ¹

12.1. 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 коэффициент направленного действия антенны.

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

Примечание. Зависимость отношения фазовой скорости v_ϕ к скорости света c от отношения среднего диаметра стержня d к длине волны λ при данном значении ϵ показана на рис. 30.

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

12.4. Определить фазовую скорость v_ϕ волны в диэлектрической антенне оптимальных размеров и коэффициент направленного действия антенны D , если излучающий стержень имеет длину $l_a = 30$ см при длине волны $\lambda = 60$ см.

12.5.* Рассчитать диэлектрическую антенну в виде стержня оптимальных размеров с коэффициентом усиления $G \geq 30$ ($G \geq 14,7 \text{ дБ}$) при длине волны $\lambda = 7$ см. В процессе расчета определить длину l_a , максимальный $d_{\max}$ и минимальный $d_{\min}$ диаметры стержня (см. рис. 26); фазовую скорость в нем, пользуясь зависимостью этой скорости v_ϕ от отношения среднего диаметра стержня d к длине волны λ (см. рис. 30); затухание, вызванное тепловыми потерями в стержне; коэффициенты направленного действия; построить диаграммы направленности в плоскостях E и H и определить их ширину.

¹ Знак (*) при номере задачи означает, что к этой задаче дано решение.

12.6.* Рассчитать цилиндрическую спиральную антенну (см. рис. 26), 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 диаграмму направленности антенны и определить ее ширину.

12.7. Спиральная антенна с осевым излучением (см. рис. 26)

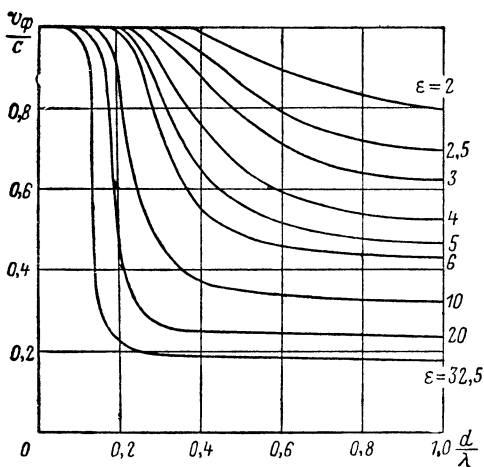


Рис. 30.

имеет длину одного витка $l_c=15$ см и длину спирали по ее оси $l_a=60$ см. Определить ширину диаграммы направленности $2\varphi'$, коэффициент направленного действия D и входное сопротивление антенны $R_{вх}$ при длине волны $\lambda=15$ см.

12.8.* Рассчитать антенну поверхностных волн с замедляющей структурой в виде прямоугольных канавок при средней волне рабочего диапазона $\lambda_{\text{ср}}=3$ см и возбуждения структуры рупором, раскрыв которого имеет ширину $a=30$ мм (рис. 31). Коэффициент направленного

действия антенны D должен быть не менее 34.

12.9. Определить длину l_a и коэффициент замедления k антенны поверхностных волн с замедляющей структурой в виде ребристой поверхности оптимальных размеров (см. рис. 31), если коэффициент направленного действия антенны $D=30$ при длине волны $\lambda=5$ см.

12.10.* Рассчитать волноводно-щелевую антенну (см. рис. 27), которая имеет на волне $\lambda=3,2$ см коэффициент усиления $G=12,6$ ($G=11$ дБ) и излучает мощность $P_{\text{в}}=50$ кВт.

12.11. Определить коэффициент усиления G щелевой антенны, состоящей из шести синфазных полуволновых щелей.

12.12. Определить коэффициент усиления G H -плоскостного секториального рупора оптимальных размеров, который при раскрыве $a'=60$ см и $b'=6,4$ см (см. рис. 28, а) принимает волны длиной $\lambda=20$ см.

12.13. Определить оптимальные значения размера b' раскрыва и длины l E -плоскостного секториального рупора (см. рис. 28, б), который при длине волны $\lambda=5$ см и размере $a'=3,55$ см имеет коэффициент усиления $G=25$.

12.14.* Рассчитать пирамидальный рупор, который при воз-

буждении прямоугольным волноводом МЭК-100 на волне $\lambda=3$ см имеет коэффициент усиления $G \geq 40$ ($G \geq 16$ дБ).

12.15. Пирамидальный рупор оптимальных размеров (см. рис. 18, 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.

12.16. Определить угол расширения θ и диаметр d конического рупора оптимальных размеров, который имеет длину $l=40$ см, длина волны $\lambda=8$ см (см. рис. 18, г).

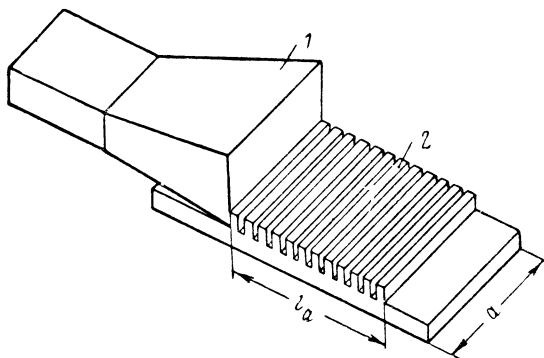


Рис. 31.

12.17. Определить коэффициент усиления и ширину диаграммы направленности в плоскостях E (угол $2\varphi'_E$) и H (угол $2\varphi'_H$) конического рупора по данным задачи 12.16.

12.18. Определить ширину диаграммы направленности в плоскостях E и H по данным задачи 12.12.

12.19. Определить ширину диаграммы направленности антенны в плоскостях E и H по данным задачи 12.13.

12.20. Определить ширину диаграммы направленности антенны в плоскостях E и H по данным задачи 12.15.

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

12.22. Какое из трех значений угла раскрыва параболической антенны $\psi=35, 90, 130^\circ$ является наиболее приемлемым, если в качестве облучателя используется диполь?

12.23. Определить ширину диаграммы направленности $2\varphi'_E$, $2\varphi'_H$ антенны с рефлектором в виде параболоида вращения диаметром $d=50$ см, облучателем в виде полуволнового вибратора с

плоским контррефлектором, если длина волны, на которой работает антенна, $\lambda = 2,5$ см.

12.24.* Определить толщину m незонированной (см. рис. 29, а) и зонированной (рис. 29, 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 размер $m''=2$ см.

12.25. Определить, во сколько раз уменьшится толщина диэлектрической линзы, изготовленной из полистирола ($n=1,6$) и имеющей диаметр $d=150$ см, фокусное расстояние $f=160$ см, если применить в ней зонирование при длине волны $\lambda=8$ см, и размере $m''=1,5$ см (рис. 29, б).

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

12.27.* 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. 29, в).

12.28. Какой станет толщина линзы m , данные которой приведены в задаче 12.27*, если эту линзу зонировать?

12.29. Какое расстояние $a_{\text{пл}}$ должно быть между металлическими пластинами незонированной ускоряющей линзы (рис. 29, в), чтобы показатель преломления ее был равен 0,5 при длине волны $\lambda=4$ см?

12.30. Дисковая линза из искусственного диэлектрика имеет показатель преломления $n=1,55$. Сколько дисков N должно быть в каждом 1 см³ ее объема, если радиус одного диска равен 0,5 см?

12.31. Линза из искусственного диэлектрика образована металлическими лентами шириной 0,6 см каждая, впрессованными в пенный полистирол. Сколько таких лент N должно приходиться на 1 см² площади продольного сечения линзы, чтобы показатель преломления линзы был равен 1,6?

12.32.* Определить фокусное расстояние параболоида вращения, имеющего угол раскрыва 30° и коэффициент направленного действия 400 при длине волны 3 см и коэффициенте использования поверхности раскрыва антенны 0,6.

12.33. Определить угол раскрыва ψ параболоида вращения, имеющего фокусное расстояние 20 см и коэффициент направленного действия 1000 при длине волны 4 см и коэффициенте использования поверхности антенны 0,5.

12.34.* Определить основные геометрические размеры и направленные свойства антенны в виде параболоида вращения, облучаемого полуволновым вибратором с дисковым контррефлектором (рис. 32), если известно, что при данных размерах антенны и дли-

не волны $\lambda = 12$ см достигнут наибольший коэффициент направленного действия $D = 350$.

Примечание. В данном случае коэффициент D имеет максимум при угле раскрытия рефлектора $\psi = (30-35)^\circ$; принимаем $\psi = 32^\circ$ и коэффициент использования поверхности раскрыва $\gamma = 0,55$.

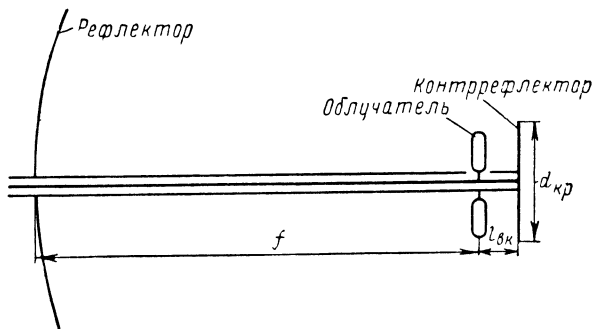


Рис. 32.

12. 35.* Рассчитать H -плоскостной рупор с корректирующей металло-пластинчатой линзой. Коэффициент усиления антенны $G = 15$ при длине волны $\lambda = 8$ см.

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

К ГЛАВЕ I

1.1. 1. Рассчитываем ширину спектра радиосигнала. Согласно формуле (1.2)

$$\Delta f_{\text{сп}} = \frac{\Delta \omega_{\text{сп}}}{2\pi} = \frac{2\Omega_{\text{max}}}{2\pi} = 2F_{\text{max}} = 10 \text{ кгц}.$$

2. Определяем число станций N . Так как радиосигналы станций должны полностью отличаться по частотам спектров, то в диапазоне частот от 100 до 1000 кгц

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{1000 - 100}{10} = 90;$$

в диапазоне частот 1—10 Мгц

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{10^4 - 10^3}{10} = 900;$$

в диапазоне частот 10—100 Мгц

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{(100 - 10) 10^3}{10} = 9000.$$

Все эти диапазоны частот имеют одинаковый коэффициент перекрытия

$$\frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} = \frac{1000 \text{ кгц}}{100 \text{ кгц}} = \frac{10 \text{ Мгц}}{1 \text{ Мгц}} = \frac{100 \text{ Мгц}}{10 \text{ Мгц}} = 10,$$

однако, как видно из примера, чем больше абсолютные значения радиочастот, тем больше на этих частотах может работать радиостанций.

1. 2. $F_{\text{max}} = 15 \text{ кгц}.$

1. 3. $i = 100 \sin(2\pi \cdot 10^6 t) + 25 \sin(200 \cdot 2\pi \cdot 10^3 t) + 25 \sin(1998\pi \cdot 10^3 t) \text{ ма}.$

1. 5. 1. Индекс частотной модуляции

$$M = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} = \frac{2\pi \Delta f_m}{2\pi F} = \frac{\Delta f_m}{F} = \frac{30}{10} = 3.$$

2. Значения функции Бесселя для $M=3$, как видно из приложения I равны: $J_0(M)=-0,26$; $J_1(M)=0,34$; $J_2(M)=0,49$; $J_3(M)=0,31$; $J_4(M)=0,13$.

3. Амплитуды несущей частоты, первой, второй, третьей и четвертой пар боковых частот соответственно равны

$$U_m J_0(M) = 100(-0,26) = -26 \text{ в};$$

$$U_m J_1(M) = 100 \cdot 0,34 = 34 \text{ в};$$

$$U_m J_2(M) = 100 \cdot 0,49 = 49 \text{ в};$$

$$U_m J_3(M) = 100 \cdot 0,31 = 31 \text{ в};$$

$$U_m J_4(M) = 100 \cdot 0,13 = 13 \text{ в}.$$

4. Мгновенное значение напряжения радиосигнала выражается уравнением (1.4):

$$\begin{aligned} u = & -26 \sin(2\pi \cdot 5 \cdot 10^7 t) + 34 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 + 10^4)t - \\ & - 34 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 - 10^4)t + 49 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 + 2 \cdot 10^4)t + \\ & + 49 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^4)t + 31 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 + \\ & + 3 \cdot 10^4)t - 31 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^4)t + 13 \sin 2\pi \times \\ & \times (5 \cdot 10^7 + 4 \cdot 10^4)t + 13 \sin 2\pi(5 \cdot 10^7 - 4 \cdot 10^4)t + \dots \text{ в}. \end{aligned}$$

1.6. 1. Индекс частотной модуляции

$$M = \frac{\Delta f_m}{F} = \frac{100}{5} = 20.$$

2. Поскольку $M \gg 1$, ширина спектра частот определяется по формуле (1.5):

$$\Delta f_{\text{сп}} = \frac{\Delta \omega_{\text{сп}}}{2\pi} = \frac{2M \cdot 2\pi F}{2\pi} = 2MF = 2 \cdot 20 \cdot 5 = 200 \text{ кГц}.$$

3. Число радиостанций, работающих без перекрытия спектров по частоте:

при $\Delta f = (100 \div 1000) \text{ кГц}$

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{1000 - 100}{200} \approx 4,$$

при $\Delta f = (1 \div 10) \text{ МГц}$

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{сп}}} = \frac{10^4 - 10^3}{200} = 45,$$

при $\Delta f = (10 \div 100) \text{ МГц}$

$$N = \frac{10^5 - 10^4}{200} = 450.$$

Как видим, частотную модуляцию с большим индексом M нельзя использовать на низких радиочастотах из-за большой ширины спектра радиосигнала. В диапазоне низких радиочастот обычно используется только амплитудная модуляция.

1. 7. $\Delta f_m = 30$ кГц, $M = 6$.

1. 8. Так как при АМ $\Delta \omega_{\text{сн}} = 2\Omega_{\text{max}}$, то ширина спектра АМ сигнала уменьшается в два раза, а поскольку при ЧМ $\Delta \omega_{\text{сн}} = 2\Delta \omega_{\text{max}}$ и девиация частоты $\Delta \omega_{\text{max}}$ прямо пропорциональна амплитуде напряжения управляющего сигнала, то ширина спектра ЧМ сигнала увеличится в четыре раза.

$$1. 9. u = -20 \sin(12\pi \cdot 10^7 t) + 18 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 + 30 \cdot 10^3)t] + \\ + 18 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 - 30 \cdot 10^3)t] + 21,5 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 + \\ + 45 \cdot 10^3)t] - 21,5 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 - 45 \cdot 10^3)t] + \\ + 14 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 + 60 \cdot 10^3)t] + 14 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 - 60 \cdot 10^3)t] + \\ + 6,5 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 + 75 \cdot 10^3)t] - \\ - 6,5 \sin[2\pi(6 \cdot 10^7 - 75 \cdot 10^3)t].$$

$$1. 10. \Delta f_{\text{сн}} = 160 \text{ кГц}; \quad M = 20.$$

К ГЛАВЕ II

$$2. 5. u_L = U_m \sin(\omega t + \varphi_0); \quad e_L = -U_m \sin(\omega t + \varphi_0); \\ i = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t + \varphi_0 - 90^\circ); \quad \dot{U}_L = U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)};$$

$$\dot{E}_L = U_m e^{j(\omega t + \varphi_0 - 180^\circ)}; \quad \dot{I} = \frac{U_m}{\omega L} e^{j(\omega t + \varphi_0 - 90^\circ)}.$$

$$2. 6. u_L = 80 \sin(360 \cdot 10^7 t + 30)^\circ \text{ в}; \\ e_L = -80 \sin(360 \cdot 10^7 t + 30)^\circ \text{ в}; \\ i = 0,02 \sin(360 \cdot 10^7 t - 60)^\circ \text{ а}.$$

2. 7. Индуктивное сопротивление увеличится в 5 раз.

2. 8.

1. Определяем средний диаметр катушки D . Из формулы (2.1)

$$D = \frac{L \left(\frac{l}{D} + 0,44 \right)}{0,001 \omega^2} = \frac{60(1,5 + 0,44)}{10^{-3} \cdot 30^2} = 129,3 \text{ мм}.$$

2. Определяем длину катушки:

$$l = 1,5D = 1,5 \cdot 129,3 = 194 \text{ мм}.$$

3. Определяем добротность катушки. Согласно формуле (2.5)

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 60 \cdot 10^{-6}}{10} = 60\pi \approx 188.$$

2. 9. 1. Находим средний диаметр катушки:

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{20 + 40}{2} = 30 \text{ мм}.$$

2. Находим высоту катушки:

$$h = \frac{D_2 - D_1}{2} = \frac{40 - 20}{2} = 10 \text{ мм}.$$

3. Находим длину намотки:

$$l = \frac{D}{2} = 15 \text{ мм.}$$

4. Находим число витков намотки. Исходя из формулы (2.2) имеем

$$\begin{aligned} w &= \frac{1}{D} \sqrt{\frac{L(3D + 9l + 10h)}{0,008}} = \\ &= \frac{1}{30} \sqrt{\frac{200(3 \cdot 30 + 9 \cdot 15 + 10 \cdot 10)}{8 \cdot 10^{-3}}} = 95 \text{ витков.} \end{aligned}$$

2. 10. $M_{\max} = 10 \text{ мкГн.}$

2. 11. 1. Вычисляем размер r вариометра. Из рис. 1, в, видно, что

$$r = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{ст}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{ст}}}{2}\right)^2} = \sqrt{33^2 + 33^2} = 46,6 \text{ мм.}$$

2. Определяем максимальную взаимную индуктивность между обмотками вариометра. На основании формулы (2.4)

$$M_{\max} = 1,974 \frac{\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 w_{\text{ст}} w_p}{r} 10^{-3} = \frac{1,974 \cdot 15^2 \cdot 35 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{46,6} = 5 \text{ мкГн.}$$

3. Определяем индуктивность статорной катушки. Обе катушки вариометра однослойные, поэтому пользуемся формулой (2.1):

$$L_{\text{ст}} = \frac{0,001 D_{\text{ст}} w_{\text{ст}}^2}{\frac{l_{\text{ст}}}{D_{\text{ст}}} + 0,44} = \frac{0,001 \cdot 66 \cdot 35^2}{\frac{66}{66} + 0,44} = 56,1 \text{ мкГн.}$$

4. Определяем индуктивность роторной катушки:

$$L_p = \frac{0,001 D_p w_p^2}{\frac{l_p}{D_p} + 0,44} = \frac{0,001 \cdot 30 \cdot 15^2}{\frac{30}{30} + 0,44} = 4,7 \text{ мкГн.}$$

5. Определяем минимальную индуктивность вариометра:

$$L_{\min} = L_{\text{ст}} + L_p - 2M_{\max} = 56,1 + 4,7 - 2 \cdot 5 = 50,8 \text{ мкГн.}$$

6. Определяем максимальную индуктивность вариометра:

$$L_{\max} = L_{\text{ст}} + L_p + 2M_{\max} = 56,1 + 4,7 + 2 \cdot 5 = 70,8 \text{ мкГн.}$$

2. 12. Емкостное сопротивление уменьшится в 12 раз.

2. 13. 1. Согласно формуле (2.6) число пластин конденсатора

$$N = 1 + \frac{aC}{0,009 \varepsilon S} = 1 + \frac{0,8 \cdot 1000}{0,009 \cdot 1 \cdot 250} \approx 356.$$

2. Высота воздушного конденсатора

$$h = bN + a(N - 1) = 0,4 \cdot 356 + 0,8 \cdot 355 = 426,4 \text{ мм.}$$

3. Объем воздушного конденсатора

$$V_k = Sh = 250 \cdot 426,4 = 10\,660 \text{ мм}^3.$$

2. 14. $N=7$; $h=0,81 \text{ мм}$; $V_k=202,5 \text{ мм}^3$.

2. 15. 1. Преобразуем параллельное соединение X_C и $R_{ш}$ в последовательное соединение x_C и $r_{шC}$. Исходя из формул (2.8) и (2.9) находим

$$|X_C| = |x_C| = 500 \text{ ом};$$
$$r_{шC} = \frac{X_C^2}{R_{ш}} = \frac{500^2}{5 \cdot 10^4} = 5 \text{ ом}.$$

2. Находим сопротивления эквивалентного контура, показанного на рис. 2, б:

реактивные сопротивления

$$|x_L| = |x_C| = 500 \text{ ом};$$

активное сопротивление емкостной ветви

$$r'_C = r_C + r_{шC} = 0,5 + 5 = 5,5 \text{ ом};$$

активное сопротивление индуктивной ветви, поскольку сопротивление $R_{ш}$ отнесено к емкостной ветви, равно

$$r'_L = r_L = 3 \text{ ом};$$

и сопротивление эквивалентных потерь всего контура

$$r = r'_L + r'_C = 3 + 5,5 = 8,5 \text{ ом}.$$

3. Определяем индуктивность контура. Так как $|x_L| = \omega L$, то

$$L = \frac{|x_L|}{\omega} = \frac{|x_L|}{2\pi f} = \frac{500}{2\pi \cdot 10^6} = 79,6 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 79,6 \text{ мкгн}.$$

4. Определяем емкость контура. Поскольку $|x_C| = \frac{1}{\omega C}$, то

$$C = \frac{1}{\omega |x_C|} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 500} = 318 \cdot 10^{-12} \text{ ф} = 318 \text{ пф}.$$

2. 16. $C=53,1 \text{ нф}$; $r=6,6 \text{ ом}$; $L=19,1 \text{ мкгн}$.

2. 17. $Q_C=5308$; $\text{tg } \delta_C=18,84 \cdot 10^{-5}$; $Q'_C=9,41$; $\text{tg } \delta'_C=0,106$.

2. 20. 1. Собственная частота контура согласно уравнению (2.10)

$$f_0 = \frac{300}{\lambda_0} = \frac{300}{100} = 3 \text{ Мгц}.$$

2. Емкость контура определяем из формулы (2.11):

$$C = \frac{\lambda_0^2}{1,882L} = \frac{100^2}{3,53 \cdot 35} = 81 \text{ пф.}$$

3. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{35 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 10^{-12}}} = 658 \text{ ом.}$$

4. Амплитуда тока в контуре

$$I_m = \frac{U_m}{\varrho} = \frac{25}{658} = 38 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 38 \text{ ма.}$$

2.21. $T_0 = 34,4 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$; $f_0 = 2,907 \text{ Мгц}$; $\lambda_0 = 103,2 \text{ м}$; $\varrho = 547 \text{ ом}$.

2.22. $L = 16,9 \text{ мкгн}$; $\varrho = 530 \text{ ом}$; $T_0 = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$; $\lambda_0 = 60 \text{ м}$.

2.23. 1. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \frac{U_m}{I_m} = \frac{60}{0,06} = 1000 \text{ ом.}$$

2. Собственная длина волны контура

$$\lambda_0 = \frac{300}{f_0} = \frac{300}{0,5} = 600 \text{ м.}$$

3. Индуктивность контура в соответствии с выражением (2.14)

$$L = \frac{x_L \lambda_0}{1880} = \frac{\varrho \lambda_0}{1880} = \frac{1000 \cdot 600}{1880} = 319 \text{ мкгн.}$$

4. Емкость контура согласно выражению (2.15)

$$C = \frac{530 \lambda_0}{x_C} = \frac{530 \lambda_0}{\varrho} = \frac{530 \cdot 600}{1000} = 318 \text{ пф.}$$

2.24. $L = 26,6 \text{ мкгн}$; $C = 100 \text{ пф}$; $f_0 = 3 \text{ Мгц}$; $T_0 = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$.

2.25. 1. Собственная длина волны [см. (2.10)]

$$\lambda_0 = \frac{300}{f_0} = \frac{300}{1,5} = 200 \text{ м.}$$

2. Емкость контура в соответствии с выражением (2.11) будет

$$C = \frac{\lambda_0^2}{1,882L} = \frac{4 \cdot 10^4}{3,53 \cdot 100} = 113,3 \text{ пф.}$$

3. Характеристическое сопротивление контура согласно (2.13)

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 10^{-6}}{113,3 \cdot 10^{-12}}} = 940 \text{ ом.}$$

4. Начальная амплитуда напряжения согласно (2.16)

$$U_{m0} = I_{m0} \varrho = 0,1 \cdot 940 = 94 \text{ в.}$$

5. Постоянная времени контура

$$\tau_k = \frac{2L}{r} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{5} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ сек} = 40 \text{ мксек.}$$

6. Логарифмический декремент затухания

$$\vartheta = \frac{\pi r}{\varrho} = \frac{3,14 \cdot 5}{940} = 0,0167.$$

7. Затухание контура

$$d = \frac{r}{\varrho} = \frac{5}{940} = 0,00532.$$

8. Добротность контура

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{1}{0,00532} = 188.$$

2. 26. $L = 7,1 \text{ мкГн}; T_0 = 0,167 \cdot 10^{-6} \text{ сек}; \lambda_0 = 50 \text{ м}; U_{mL} = U_{mC} = 13,3 \text{ в}; U_{mr} = 0,3 \text{ в}.$

2. 27. 1. Характеристическое сопротивление контура согласно (2.13)

$$\varrho = \frac{U_{m0}}{I_{m0}} = \frac{80}{0,1} = 800 \text{ ом.}$$

2. Индуктивность контура согласно (2.14)

$$L = \frac{x_L \lambda_0}{1880} = \frac{\varrho \lambda_0}{1880} = \frac{800 \cdot 80}{1880} = 34 \text{ мкГн.}$$

3. Емкость контура согласно (2.15)

$$C = \frac{530 \lambda_0}{x_C} = \frac{530 \lambda_0}{\varrho} = \frac{530 \cdot 80}{800} = 53 \text{ пф.}$$

4. Сопротивление активных потерь в контуре

$$r = \frac{\varrho}{Q} = \frac{800}{100} = 8 \text{ ом.}$$

5. Затухание контура

$$d = \frac{1}{Q} = 0,01.$$

6. Логарифмический декремент затухания

$$\vartheta = \frac{\pi r}{\varrho} = \pi d = 3,14 \cdot 0,01 = 0,0314.$$

7. Постоянная времени контура

$$\tau_k = \frac{2L}{r} = \frac{2 \cdot 34 \cdot 10^{-6}}{8} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек} = 8,5 \text{ мксек.}$$

2.28. $C=22,6 \text{ нф}$; $r=9,4 \text{ ом}$; $f_0=7,5 \text{ Мгц}$; $\Phi=0,0314$; $\tau_K=4,26 \text{ мксек}$; $d=0,01$.

2.29. $L=91,2 \text{ мкгн}$; $C=278,3 \text{ нф}$; $r=45,7 \text{ ом}$; $Q=12,5$; $\Phi=0,25$; $\tau_K=4 \text{ мксек}$.

2.30. 1. Из формулы (2.12) индуктивность контура

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = \frac{1}{4 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^{12} \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 15,6 \text{ мкгн}.$$

2. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{15,6 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-12}}} = 395 \text{ ом}.$$

3. Сопротивление потерь, соответствующее критическому затуханию контура, равно

$$r_{\text{кр}} = 2\varrho = 2 \cdot 395 = 790 \text{ ом}.$$

Так как сопротивление r , равное 4 ом , меньше $r_{\text{кр}}$, то разряд контурного конденсатора имеет колебательный характер.

2.31. При $r=20 \text{ ом}$ разряд конденсатора имеет колебательный характер, а критическому затуханию соответствует $r=883,4 \text{ ом}$.

2.34. 1. Индуктивность контура с учетом (2.12) равна

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = \frac{1}{4 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 28 \text{ мкгн}.$$

2. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{28 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-12}}} = 530 \text{ ом}.$$

3. Сопротивление потерь в контуре

$$r = \frac{\varrho}{Q} = \frac{530}{100} = 5,3 \text{ ом}.$$

4. Длительность переходного процесса в контуре

$$t = (3 \div 5) \tau_K = \frac{(6 \div 10)L}{r} = \frac{(6 \div 10) 28 \cdot 10^{-6}}{5,3} = (32 \div 53) 10^{-6} \text{ сек} = (32 \div 53) \text{ мксек}.$$

2.35. $t = (77-128) \text{ мксек}$.

2.36. 1. Емкость контура согласно (2.11) равна

$$C = \frac{\lambda_0^2}{1,88^2 L} = \frac{980^2}{3,53 \cdot 400} = 675 \text{ нф}.$$

2. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{400 \cdot 10^{-6}}{675 \cdot 10^{-12}}} = 770 \text{ ом}.$$

3. Активное сопротивление контура

$$r = \frac{\vartheta_0}{\pi} = \frac{0,04 \cdot 770}{3,14} = 9,8 \text{ ом.}$$

4. Частота вынужденных колебаний в контуре

$$f = \frac{300}{\lambda} = \frac{300}{1000} = 0,3 \text{ МГц.}$$

5. Реактивное сопротивление контура

$$x = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 2\pi \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 400 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 675 \cdot 10^{-12}} = -36 \text{ ом.}$$

6. Модуль полного сопротивления контура

$$z_{\text{вх}} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{9,8^2 + 36^2} = 37,4 \text{ ом.}$$

7. Модуль амплитуды тока в контуре

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{Z_{\text{вх}}} = \frac{0,5}{37,4} = 0,0133 \text{ а} = 13,3 \text{ ма.}$$

8. Сдвиг по фазе между э. д. с. и током генератора

$$\varphi_{\text{вх}} = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{-36}{9,8} = \arctg(-3,67) = -74^\circ 15'.$$

Отрицательное значение угла $\varphi_{\text{вх}}$ указывает на отставание по фазе э. д. с. генератора от его тока. Значит, ток генератора, кроме активной, имеет реактивную составляющую емкостного характера.

2.38. $I_m = 13,5 \text{ ма}$. Контур в резонансе с генератором.

2.39. $\mathcal{E}_{m1} = 5,3 \text{ в}$; $U_{mL} = 951,4 \text{ в}$; $U_{mC} = 208,9 \text{ в}$; $U_{mr} = 2,5 \text{ в}$; $\varphi = 89^\circ 48'$.

2.41. Поскольку имеет место резонанс напряжений, добротность контура

$$Q = \frac{U_{mC}}{\mathcal{E}_{m1}} = \frac{60}{0,4} = 150.$$

2. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = Qr = 150 \cdot 4 = 600 \text{ ом.}$$

3. Индуктивность контура на основании формулы (2.13)

$$L = \frac{\varrho}{\omega_0} = \frac{600}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^5} = 191 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 191 \text{ мкгн.}$$

4. Емкость контура согласно формуле (2.13)

$$C = \frac{1}{\omega_0 \varrho} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 600} = 530 \text{ пф.}$$

5. Амплитуда тока в контуре

$$I_{mk} = I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{r} = \frac{0,4}{4} = 0,1 \text{ а.}$$

6. Амплитуда напряжения на индуктивности при резонансе равна амплитуде напряжения на емкости, т. е. $U_{mL} = U_{mC} = 60$ в.

7. Амплитуда напряжения на активном сопротивлении равна амплитуде э. д. с. генератора, т. е.

$$U_{mr} = I_{mK} r = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ в} = \mathcal{E}_{m1}.$$

2. 42. $L = 28,6$ мкГн; $r = 15$ ом; $I_{mK} = 0,4$ а; $U_{mL} = U_{mC} = 400$ в; $U_{mr} = 6$ в.

2. 43. $L = 5,3$ мкГн; $C = 21,2$ пФ; $r = 4$ ом; $\theta = 0,025$; $d = 0,008$.

2. 45. 1. Индуктивность контура находим следующим образом.

Подставив в выражение (2. 25) $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ и $Q = \frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$,

получим

$$\Delta f_{np} = \frac{f_0}{Q} = \frac{r}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{r}{2\pi L},$$

откуда

$$L = \frac{r}{2\pi \Delta f_{np}} = \frac{8}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^4} = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} = 127 \text{ мкГн}.$$

2. Резонансная частота контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{127 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}} = 10^6 \text{ Гц} = 1 \text{ МГц}.$$

3. Характеристическое сопротивление контура

$$\mathcal{E} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{127 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-12}}} \approx 800 \text{ ом}.$$

4. Добротность контура

$$Q = \frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{800}{8} = 100.$$

5. Из уравнения (2. 24) определяем модуль коэффициента передачи при различных расстройках Δf :

при расстройке $\Delta f = 0$, т. е. при резонансе,

$$K_0 = Q = 100,$$

при расстройке $\Delta f = 2$ кГц

$$K = \frac{Q}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{1 + 10^4 \left(\frac{4}{10^3}\right)^2}} = 98,2;$$

при расстройке $\Delta f = 5$ кГц

$$K = \frac{100}{\sqrt{1 + 10^4 \left(\frac{10}{10^3}\right)^2}} = 70,7;$$

и при расстройке $\Delta f = 12$ кГц

$$K = \frac{100}{\sqrt{1 + 10^4 \left(\frac{24}{10^3} \right)^2}} = 38,5.$$

2. 47. $K_0 = 77$.

2. 52. 1. Определяем амплитуду тока генератора. Так как амплитуда напряжения на контуре

$$U_{mк} = U_{m1} = \mathcal{E}_{m1} - I_{m1}R_B,$$

то амплитуда тока генератора

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1} - U_{m1}}{R_B} = \frac{300 - 120}{40} = 4,5 \text{ ма.}$$

2. Входное сопротивление контура

$$R_{вхI} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}} = \frac{120}{4,5} = 26,7 \text{ ком.}$$

3. Определяем индуктивность контура. Поскольку $R_{вхI} = \frac{L}{Cr}$, индуктивность контура

$$L = R_{вхI}Cr = 26,7 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 7 = 37,7 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 37,4 \text{ мкгн.}$$

4. Характеристическое сопротивление контура:

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{37,4 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-12}}} = 432 \text{ ом.}$$

5. Добротность контура:

$$Q = \frac{\varrho}{r} = \frac{432}{7} = 62.$$

6. Амплитуда тока в контуре:

$$I_{mк} = I_{m1}Q = 4,5 \cdot 62 = 279 \text{ ма.}$$

2. 53. $C = 44,3$ пф; $\mathcal{E}_m = 329,8$ в; $I_{mк} = 138$ ма; $I_{m1} = 1,15$ ма.

2. 54. $L = 1,33$ мкгн; $C = 22,1$ пф; $r = 2,9$ ом; $U_{m1} = 360$ в; $\mathcal{E}_{m1} = 1080$ в.

2. 55. В контуре II вида $L_1 = 1,03$ мкгн; $L_2 = 0,3$ мкгн. В контуре III вида $C_1 = 28,5$ пф; $C_2 = 98,4$ пф; $I_{mк}/I_{m1} = 65$.

2. 57. $\mathcal{E}_m = 116,6$ в; $I_{m1} = 52,5$ ма.

2. 58. $L_1 = 71,9$ мкгн; $L_2 = 29,5$ мкгн; $r = 5,1$ ом.

2. 59. $C_1 = 697,5$ пф; $C_2 = 1895,8$ пф; $r = 5,2$ ом.

2. 60. 1. Общая индуктивность контура

$$L = L_1 + L_2 = 5 + 4 = 9 \text{ мкгн.}$$

2. Общая емкость контура

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{70 \cdot 55}{70 + 55} = 30,8 \text{ нф.}$$

3. Общее сопротивление активных потерь в контуре

$$r = r_1 + r_2 = 3,5 + 2,5 = 6 \text{ ом.}$$

4. Резонансная частота контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{9 \cdot 10^{-6} \cdot 30,8 \cdot 10^{-12}}} = 9,57 \text{ Мгц.}$$

5. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-12}}} = 539 \text{ ом.}$$

6. Добротность контура

$$Q = \frac{\varrho}{r} = \frac{539}{6} \approx 90.$$

7. Реактивное сопротивление левой ветви контура при резонансе

$$x_1 = \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = 2\pi \cdot 9,57 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2\pi \cdot 9,57 \cdot 10^6 \cdot 70 \cdot 10^{-12}} = 63 \text{ ом.}$$

Такое же (по абсолютной величине) сопротивление должна иметь правая ветвь контура:

$$x_2 = \omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2} = 2\pi \cdot 9,57 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2\pi \cdot 9,57 \cdot 10^6 \cdot 55 \cdot 10^{-12}} = -63 \text{ ом.}$$

8. Входное сопротивление контура при резонансе

$$R_{\text{вх}} = \frac{x_1^2}{r} = \frac{x_2^2}{r} = \frac{63^2}{6} \approx 660 \text{ ом.}$$

2.61. 1. Амплитуда тока питающей цепи

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{R_{\text{в}} + R_{\text{вх}}} = \frac{200}{10 + 0,66} = 18,8 \text{ ма.}$$

2. Напряжение генератора

$$U_{m1} = \mathcal{E}_{m1} - I_{m1} R_{\text{в}} = 200 - 10 \cdot 18,8 \approx 12 \text{ в.}$$

3. Амплитуда тока контура

$$I_{mk} = I_{mL} = I_{mC} = \frac{U_{m1}}{x_1} = \frac{12}{63} = 194 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 194 \text{ ма.}$$

Как видим, ток контура превышает ток генератора в 10,5 раза. То же отношение токов получим из формулы (2.33)

$$\frac{I_{mк}}{I_{m1}} = \frac{|x_1|}{r} = \frac{|x_2|}{r} = \frac{63}{6} \approx 10,5.$$

2.62. $\lambda = 99,4$ м, $\phi = 0,0264$; $R_{вх} = 1350$ ом.

2.63. $C_2 = 41,3$ нф; $r_2 = 4,9$ ом; $R_{вх} = 5121$ ом.

2.64. 1. Общая индуктивность контура

$$L = L_1 + L_2 = 50 + 60 = 110 \text{ мкГн.}$$

2. Общая емкость контура

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{500 \cdot 600}{500 + 600} = 273 \text{ нф.}$$

3. Сопротивление активных потерь в контуре

$$r = r_1 + r_2 = 3 + 3,5 = 6,5 \text{ ом.}$$

4. Резонансная угловая частота контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{110 \cdot 10^{-6} \cdot 273 \cdot 10^{-12}}} = 5,77 \cdot 10^6 \text{ рад/сек.}$$

5. Реактивное сопротивление одной ветви контура общего вида

$$x_1 = \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = 5,77 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{5,77 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = -58,1 \text{ ом.}$$

6. Входное сопротивление контура общего вида

$$R_{вх} = \frac{x_1^2}{r} = \frac{58,1^2}{6,5} = 519,4 \text{ ом.}$$

7. Входное сопротивление контура I вида (рис. 4, а)

$$R_{вх I} = \frac{L}{Cr} = \frac{110 \cdot 10^{-6}}{273 \cdot 10^{-12} \cdot 6,5} = 6,2 \cdot 10^4 \text{ ом.}$$

8. Коэффициент включения, соответствующий входному сопротивлению контуров II и III видов $\left(R_{вх II} = R_{вх III} = \frac{R_{вх I}}{2} \right)$, определяется исходя из того, что

$$p_L = p_C = \sqrt{\frac{R_{вх II}}{R_{вх I}}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = 0,71.$$

9. Индуктивности контура II вида (рис. 4, б)

$$L_1 = p_L L = 0,71 \cdot 110 = 78,1 \text{ мкГн;}$$

$$L_2 = L - L_1 = 110 - 78,1 = 31,9 \text{ мкГн.}$$

10. Емкости контура III вида (рис. 4, в)

$$C_1 = \frac{C}{p_C} = \frac{273}{0,71} = 384,5 \text{ пф},$$

а емкость C_2 определяется из равенства $\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C} - \frac{1}{C_1}$, откуда

$$C_2 = \frac{CC_1}{C_1 - C} = \frac{273 \cdot 384,5}{384,5 - 273} = 591,7 \text{ пф}.$$

2. 65. 1. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-12}}} = 633 \text{ ом}.$$

2. Добротность одиночного контура

$$Q = \frac{\varrho}{r} = \frac{633}{7} = 90,4.$$

3. Входное сопротивление одиночного контура при резонансе

$$R_{\text{вх}} = \varrho Q = 633 \cdot 90,4 = 57,2 \cdot 10^3 \text{ ом} = 57,2 \text{ ком}.$$

4. Эквивалентная добротность контура, т. е. добротность с учетом шунтирования контура внутренним сопротивлением генератора,

$$Q_s = \frac{Q}{1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_B}} = \frac{90,4}{1 + \frac{57,2}{200}} = 70,3.$$

5. Модуль коэффициента передачи напряжения контура при резонансе

$$K_0 = \frac{\varrho Q_s}{R_B} = \frac{633 \cdot 70,3}{200 \cdot 10^3} = 0,22.$$

6. Модуль коэффициента передачи напряжения контура при расстройке $\Delta f/f_0 = 0,02$

$$K = \frac{K_0}{\sqrt{1 + Q_s^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} = \frac{0,22}{\sqrt{1 + 70,3^2 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}} = 0,074.$$

2. 66. 1. Находим резонансную частоту контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{40 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-12}}} = 2,51 \cdot 10^6 \text{ гц}.$$

2. Определяем полосу пропускания контура. Согласно уравнению (2.36)

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{f_0}{Q} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_B} \right) = \frac{2,51 \cdot 10^6}{90,4} \left(1 + \frac{57,2}{200} \right) = 3,57 \cdot 10^4 \text{ гц}.$$

3. Определяем сопротивление R'_B , при котором полоса пропускания $\Delta f'_{\text{пр}} = 3\Delta f_{\text{пр}}$. Заменим в формуле (2.36) сопротивление R_B другим — R'_B , получим

$$3\Delta f_{\text{пр}} = \frac{f_0}{Q} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R'_B} \right),$$

откуда

$$R'_B = \frac{f_0 R_{\text{вх}}}{3\Delta f_{\text{пр}} Q - f_0} = \frac{2,51 \cdot 10^6 \cdot 57,2}{3 \cdot 3,57 \cdot 10^4 \cdot 90,4 - 2,51 \cdot 10^6} = 20 \text{ ком.}$$

4. Определяем шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$, которое обеспечивает трехкратное увеличение полосы пропускания. Так как

$$\frac{1}{R'_B} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_{\text{ш}}},$$

то

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_B R'_B}{R_B - R'_B} = \frac{200 \cdot 20}{200 - 20} = 22,2 \text{ ком.}$$

2. 69. $C = 251,8 \text{ нф}$; $r = 6,7 \text{ ом}$.

2. 70. $R_{\text{ш}} = 38\,820 \text{ ом}$.

К ГЛАВЕ III

3. 1. Из формулы (3.3)

$$k = \frac{\sqrt{C_1 C_{\text{II}}}}{C_{\text{св}}} = \frac{\sqrt{\frac{C_1 \cdot C_{\text{св}}}{C_1 + C_{\text{св}}} \cdot \frac{C_2 C_{\text{св}}}{C_2 + C_{\text{св}}}}}{C_{\text{св}}} = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_{\text{св}})(C_2 + C_{\text{св}})}}.$$

Подставив численные значения k , C_1 и C_2 , получим

$$0,1 = \sqrt{\frac{50 \cdot 50}{(50 + C_{\text{св}})^2}} = \frac{50}{50 + C_{\text{св}}},$$

откуда

$$C_{\text{св}} = 450 \text{ нф.}$$

3. 2. $M = 1,03 \text{ мкгн}$.

3. 3. $C_{\text{св}} = 90 \text{ нф}$.

3. 4. $k = 0,42$.

3. 5. 1. Угловая частота колебаний в контурах

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8}{\lambda (\text{м})} = \frac{18,8 \cdot 10^8}{40} = 4,7 \cdot 10^7 \text{ рад/сек.}$$

2. Реактивное сопротивление первичного контура

$$x_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 4,7 \cdot 10^7 \cdot 11 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{4,7 \cdot 10^7 \cdot 40 \cdot 10^{-12}} = -13 \text{ ом.}$$

3. Реактивное сопротивление вторичного контура

$$x_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} = 4,7 \cdot 10^7 \cdot 12 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{4,7 \cdot 10^7 \cdot 36 \cdot 10^{-12}} = -25 \text{ ом.}$$

4. Взаимоиндуктивность между контурами

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} = M \sqrt{L_1 L_2} = 0,2 \sqrt{11 \cdot 12} = 2,3 \text{ мкГн}$$

(так как $M \ll L_L, L_{II}$, то считаем $L_I = L_1 + M \approx L_1$; $L_{II} = L_2 + M \approx L_2$).

5. Реактивное сопротивление связи

$$x_{св} = \omega M = 4,7 \cdot 10^7 \cdot 2,3 \cdot 10^{-6} = 108 \text{ ом.}$$

6. Модуль полного сопротивления вторичного контура

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{4,5^2 + 25^2} = 25,4 \text{ ом.}$$

7. Активная составляющая вносимого сопротивления

$$r_{вн} = \frac{x_{св}^2}{z_2^2} r_2 = \frac{108^2}{25,4^2} 4,5 = 80,2 \text{ ом.}$$

8. Реактивная составляющая вносимого сопротивления

$$x_{вн} = -\frac{x_{св}^2}{z_2^2} x_2 = -\frac{108^2}{25,4^2} (-25) = 451,8 \text{ ом.}$$

9. Активная составляющая входного сопротивления контуров

$$R_{вх} = r_1 + r_{вн} = 4 + 80,2 = 84,2 \text{ ом.}$$

10. Реактивная составляющая входного сопротивления контуров

$$X_{вх} = x_1 + x_{вн} = -13 + 451,8 = -438,8 \text{ ом.}$$

11. Модуль полного входного сопротивления контуров

$$z_{вх} = \sqrt{R_{вх}^2 + X_{вх}^2} = \sqrt{84,2^2 + 438,8^2} = 446,7 \text{ ом.}$$

12. Амплитуда тока в первичном контуре

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{z_{вх}} = \frac{5}{446,7} = 11,2 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 11,2 \text{ ма.}$$

13. Амплитуда э. д. с. во вторичном контуре

$$\mathcal{E}_{m2} = I_{m1} x_{св} = 11,2 \cdot 10^{-3} \cdot 108 = 1,2 \text{ в.}$$

14. Амплитуда тока во вторичном контуре

$$I_{m2} = \frac{\mathcal{E}_{m2}}{z_2} = \frac{1,2}{25,4} = 47,2 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 47,2 \text{ ма.}$$

15. Амплитуда выходного напряжения

$$U_{m2} = I_{m2} \frac{1}{\omega C_2} = \frac{47,2 \cdot 10^{-3}}{4,7 \cdot 10^7 \cdot 36 \cdot 10^{-12}} = 27,8 \text{ в.}$$

3.6. 1. Индуктивность связи

$$L_{св} = k \sqrt{L_I L_{II}} = 0,1 \sqrt{50 \cdot 50} = 5 \text{ мкГн.}$$

2. Реактивное сопротивление связи согласно (2.14)

$$x_{св} = \omega L_{св} = \frac{1880 L_{св}}{\lambda} = \frac{1880 \cdot 5}{150} = 62,7 \text{ ом.}$$

3. Реактивное сопротивление вторичного контура

$$x_2 = \omega L_{II} - \frac{1}{\omega C_{II}} = \frac{1880 L_{II}}{\lambda} - \frac{530 \lambda}{C_2} = \frac{1880 \cdot 50}{150} - \frac{530 \cdot 150}{150} = 97 \text{ ом.}$$

4. Модуль полного сопротивления вторичного контура

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{6^2 + 97^2} \approx 97 \text{ ом.}$$

5. Активная составляющая сопротивления, вносимого из вторичного контура в первичный,

$$r_{вн} = \frac{x_{св}^2}{z_2^2} r_2 = \frac{62,7^2}{97^2} 6 = 2,5 \text{ ом.}$$

6. Реактивная составляющая сопротивления, вносимого из вторичного контура в первичный,

$$x_{вн} = -\frac{x_{св}^2}{z_2^2} x_2 = -\frac{62,7^2}{97^2} \cdot 97 = -40,5 \text{ ом.}$$

7. Реактивное сопротивление первичного контура определяется исходя из условия первого частного резонанса, т. е.

$$X_{вх} = x_1 + x_{вн} = 0.$$

Следовательно,

$$x_1 = -x_{вн} = 40,5 \text{ ом.}$$

8. Емкость первичного контура находим следующим образом. Так как

$$x_1 = \frac{1880 L_I}{\lambda} - \frac{530 \lambda}{C_1},$$

то

$$C_1 = \frac{530 \lambda}{\frac{1880 L_I}{\lambda} - x_1} = \frac{530 \cdot 150}{\frac{1880 \cdot 50}{150} - 40,5} = 135,5 \text{ нФ.}$$

9. Активная составляющая входного сопротивления контуров

$$R_{вх} = r_1 + r_{вн} = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ ом.}$$

10. Модуль полного входного сопротивления связанных контуров

$$Z_{вх} = \sqrt{R_{вх}^2 + X_{вх}^2} = \sqrt{8,5^2 + 0} = 8,5 \text{ ом.}$$

11. Амплитуда тока первичного контура

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{z_{BX}} = \frac{10}{8,5} = 1,18 \text{ а.}$$

12. Сдвиг по фазе между э. д. с. и током генератора (аргумент входного сопротивления контура)

$$\varphi_{BX} = \arctg \frac{X_{BX}}{R_{BX}} = \arctg \frac{0}{R_{BX}} = 0.$$

3. 7. $C_1 = 35,3 \text{ нф}$; $I_{m1} = 137 \text{ ма}$; $\varphi_{BX} = 0$.

3. 8. $C_2 = 28,1 \text{ нф}$.

3. 9. 1. Сопротивление связи, поскольку эта связь критическая, равно

$$x_{св.кр} = r = 4 \text{ ом.}$$

2. Емкость связи

$$C_{св} = \frac{1}{\omega x_{св.кр}} = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 4} = 1,325 \cdot 10^{-9} \text{ ф} = 1325 \text{ пф.}$$

3. Общая емкость одного контура

$$C = C_I = C_{II} = \frac{C_1 C_{св}}{C_1 + C_{св}} = \frac{35 \cdot 1325}{35 + 1325} \approx 35 \text{ нф.}$$

4. Индуктивность одного контура определяется следующим образом. Так как полный резонанс происходит при частоте генератора, равной собственной частоте любого контура, то $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,

а
$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 f_0^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 9 \cdot 10^{14} \cdot 35 \cdot 10^{-12}} = 0,79 \cdot 10^{-6} \text{ гн} = 0,79 \text{ мкгн.}$$

5. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{79 \cdot 10^{-8}}{35 \cdot 10^{-12}}} = 150 \text{ ом.}$$

6. Коэффициент связи

$$k = k_{кр} = d = \frac{r}{\varrho} = \frac{4}{150} = 0,0266.$$

7. Амплитуда тока в первичном контуре

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2r} = \frac{5}{2 \cdot 4} = 0,625 \text{ а.}$$

8. Амплитуда тока во вторичном контуре согласно (3. 13)

$$I_{2mm} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2r} = \frac{5}{2 \cdot 4} = 0,625 \text{ а.}$$

9. Коэффициент передачи напряжения

$$K_{mm} = \frac{Q}{2} = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \cdot 0,0266} = 18,8.$$

10. Амплитуда выходного напряжения

$$U_{2mm} = K_{mm} \mathcal{E}_{m1} = 18,8 \cdot 5 = 94 \text{ в.}$$

3. 10. $L_{св} = 5,7 \text{ мкГн}; I_{m1} = I_{m2} = 15,7 \text{ ма};$

$$U_{m2} = 12,5 \text{ в}; C_1 = C_2 = 397 \text{ пф.}$$

$$K_{mm} = 22,2.$$

3. 11. $L_1 = L_2 = 5,67 \text{ мкГн}; M = 0,057 \text{ мкГн};$

$$I_{m1} = I_{m2} = 566 \text{ ма}; K_{mm} = 50;$$

$$U_{m2} = 30 \text{ в.}$$

3. 12. 1. Характеристическое сопротивление контура

$$\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-12}}} = 387 \text{ ом.}$$

2. Затухание контура

$$d = \frac{r}{\varrho} = \frac{3}{387} = 7,75 \cdot 10^{-3}.$$

3. Коэффициент связи

$$k = 2k_{кр} = 2d = 2 \cdot 7,75 \cdot 10^{-3} = 1,55 \cdot 10^{-2}.$$

4. Взаимоиндуктивность согласно (3.1)

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} = 1,55 \cdot 10^{-2} \cdot 3 = 4,65 \cdot 10^{-2} \text{ мкГн.}$$

5. Собственная частота контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{3 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}} = 20,56 \cdot 10^6 \text{ гц} = 20,56 \text{ Мгц}$$

6. Медленная частота связи

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}} = \frac{20,56}{\sqrt{1+0,0155}} = 20,50 \text{ Мгц.}$$

7. Быстрая частота связи

$$f_{II} = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}} = \frac{20,56}{\sqrt{1-0,0155}} = 20,73 \text{ Мгц.}$$

8. Амплитуда тока в первичном контуре

$$I_{m1} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{R_{вх}} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{r + r_{вн}} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2r} = \frac{15}{6} = 2,5 \text{ а.}$$

9. Амплитуда тока во вторичном контуре

$$I_{2mm} = \frac{\mathcal{E}_{m1}}{2r} = \frac{15}{6} = 2,5 \text{ а.}$$

10. Коэффициент передачи напряжения

$$K_{mm} = \frac{Q}{2} = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \cdot 7,75 \cdot 10^{-3}} = 64,5.$$

11. Амплитуда выходного напряжения

$$U_{2mm} = K_{mm} \mathcal{E}_{m1} = 64,5 \cdot 15 = 967,5 \text{ в.}$$

3. 13. $L_{св} = 16 \text{ мкГн}; L_1 = L_2 = 793,8 \text{ мкГн};$

$$r_1 = r_2 = 15 \text{ ом}; I_{m1} = I_{m2} = 0,67 \text{ а};$$

$$K_{mm} = 50,3; U_{2mm} = 1006 \text{ в.}$$

3. 14. $\lambda_0 = 148,6 \text{ м}; M = 2,58 \text{ мкГн};$

$$I_{m2} = 1 \text{ а}; K_{mm} = 48,5; U_{m2} = 631 \text{ в.}$$

3. 15. 1. Из формулы (3.15) определяем вносимое сопротивление:

$$r_{вн} = \eta_{п.к} r_1 + \eta_{п.к} r_{вн}; r_{вн} = \frac{\eta_{п.к}}{1 - \eta_{п.к}} r_1 = \frac{0,75}{1 - 0,75} 5 = 15 \text{ ом.}$$

2. Собственная угловая частота контуров

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{60 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^{-12}}} = 7,47 \cdot 10^6 \text{ рад/сек.}$$

3. Поскольку угловая частота генератора ω по условию равна собственной частоте контуров ω_0 , то

$$r_{вн} = \frac{\omega_0^2 M^2}{r_2},$$

а взаимдуктивность M равна

$$M = \frac{\sqrt{r_2 r_{вн}}}{\omega_0} = \frac{\sqrt{5 \cdot 15}}{7,47 \cdot 10^6} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 1,16 \text{ мкГн.}$$

3. 16. $L_1 = L_2 = 34,3 \text{ мкГн}; L_{св} = 0,7 \text{ мкГн}; \eta_{п.к} = 80,8\%.$

3. 17. $\eta = 2; K_0 = 40.$

3. 18. 1. Критический коэффициент связи

$$k_{кр} = d = \frac{1}{Q} = 0,01.$$

Следовательно, при заданных значениях коэффициента связи

$$\eta = \frac{k}{k_{кр}} = 0,4; 1; 2.$$

2. Составляем табл. 3 зависимости модуля коэффициента передачи напряжения связанных контуров K от обобщенной расстройки a при значениях параметра $\eta = 0,4; 1; 2$ по формуле:

$$K = \frac{Q\eta}{\sqrt{(1+\eta^2)^2 + 2(1-\eta^2)a^2 + a^4}}.$$

Таблица 3

η	Модуль коэффициента передачи напряжения связанных контуров K при различных значениях расстройки a								
	0	$\pm 0,5$	± 1	$\pm 1,5$	$\pm 1,6$	± 2	$\pm 2,5$	± 3	$\pm 3,5$
0,4	34,5	30,1	18,3	12,9	11,7	8,2	5,8	4,2	3,1
1	50	49,7	44,7	33,2	30,8	22,4	15,2	10,8	8,1
2	40	41,3	44,7	49,3	50	48,5	38,8	27,7	19,9

По результатам вычислений строим амплитудно-частотные характеристики (рис. 33).

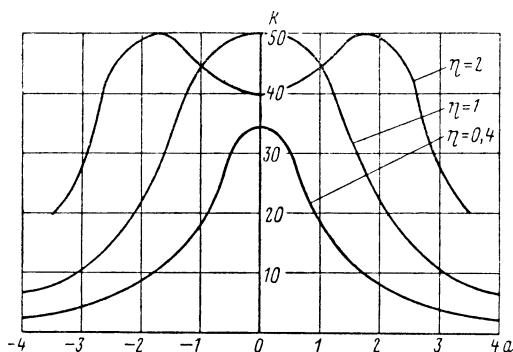


Рис. 33.

3. 19. Полоса пропускания связанной системы контуров составляет 0,75 (для $\eta=0,4$), 1,4 (для $\eta=1$) и 2,55 (для $\eta=2$) долей от полосы пропускания одиночного контура.

3. 24. 43,4 дБ.

3. 25. 1. Индуктивность звена согласно формуле (3.19)

$$L = \frac{R_n}{\pi f_c} = \frac{500}{3,14 \cdot 3 \cdot 10^3} = 0,053 \text{ гн} = 53 \text{ мкгн}.$$

2. Емкость звена согласно выражению (3.19)

$$C = \frac{1}{\pi f_c R_n} = \frac{1}{3,14 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 500} = 2,12 \cdot 10^{-7} \text{ ф} = 0,212 \text{ мкф}.$$

Т-образное звено (см. рис. 6, а) содержит две индуктивности по 26,5 мкн и одну емкость 0,212 мкф, а П-образное звено

(рис. 6, б) — одну индуктивность 53 мГн и две емкости, каждая из которых равна 0,106 мкФ.

3.26. Т-образное звено содержит две индуктивности по 0,32 Гн каждая и одну емкость 0,159 мкФ, а П-образное звено — одну индуктивность 0,64 Гн и две емкости по 0,0795 мкФ каждая.

3.27. $L=0,083$ Гн; $f_c=2300$ Гц.

3.28. 1. Индуктивность звена в соответствии с выражением (3.20)

$$L = \frac{R_H}{4\pi f_c} = \frac{10^3}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^4} = 7,96 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 7,96 \text{ мГн}.$$

2. Емкость звена согласно выражению (3.20)

$$C = \frac{1}{4\pi f_c R_H} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 10^3} = 7,96 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 7960 \text{ пФ}.$$

Т-образное звено фильтра (см. рис. 6, в) содержит две емкости по 15 820 пФ и одну индуктивность 7,96 мГн, П-образное звено (рис. 6, г) содержит одну емкость 7960 пФ и две индуктивности по 15,92 мГн.

3.29. $f_c=8900$ Гц; $R_H=1100$ Ом.

3.30. Т-образное звено состоит из двух емкостей по 66 000 пФ и индуктивности 21,2 мГн. П-образное звено состоит из емкости 33 000 пФ и двух индуктивностей по 42,4 мГн.

3.31. 1. Резонансная частота контура

$$f_0 = \sqrt{f_{C1} f_{C2}} = \sqrt{460 \cdot 470} \approx 465 \text{ кГц}.$$

2. Параметры элементов фильтра согласно формулам (3.21) равны:

$$L_1 = \frac{2R_H}{2\pi(f_{C2} - f_{C1})} = \frac{2 \cdot 10^3}{2\pi(470 - 460) 10^3} = 0,032 \text{ Гн};$$

$$L_2 = \frac{R_H \cdot 2\pi(f_{C2} - f_{C1})}{2 \cdot 4\pi^2 f_0^2} = \frac{10^3 (470 - 460) 2\pi \cdot 10^3}{2 \cdot 4\pi^2 \cdot 465^2 \cdot 10^6} = 3,64 \cdot 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$C_1 = \frac{2\pi(f_{C2} - f_{C1})}{2R_H \cdot 4\pi^2 f_0^2} = \frac{2\pi(470 - 460) 10^3}{2 \cdot 10^3 \cdot 4\pi^2 \cdot 465^2 \cdot 10^6} = 364 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \frac{2}{R_H 2\pi(f_{C2} - f_{C1})} = \frac{2}{10^3 \cdot 2\pi(470 - 460) 10^3} = 0,32 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} = 0,032 \text{ мкФ}.$$

3.32. $L_1=3,19$ мГн; $L_2=392$ мкГн; $C_1=62,8$ пФ; $C_2=5095$ пФ.

3.33. В последовательное плечо включена индуктивность 0,072 Гн, а в каждое параллельное плечо включены индуктивность 0,064 Гн и емкость 0,072 мкФ.

К ГЛАВЕ IV

4.1. Вторая линия длинная, а первая — нет.

4.2. Нельзя, так как линия представляет собой цепь с распределенными постоянными.

4.3. $Z_1 = (0,31 \div j151,2) \text{ ом/м};$

$$Y_1 = (0,9 \cdot 10^{-7} + j1,15 \cdot 10^{-9}) \text{ 1/ом} \cdot \text{м}.$$

4.4. Нельзя, так как R_1 относится к проводам линии, а G_1 является параметром среды, разделяющей эти провода.

4.5. 1. Определяем погонную индуктивность линии. Так как для воздуха $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м} = 0,4\pi \text{ мкгн/м}$, то применительно к воздушной линии формула (4.1) имеет вид

$$L_1 = \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{a}{r_1} = \frac{0,4\pi}{\pi} \cdot 2,3 \lg \frac{a}{r_1} = 0,921 \lg \frac{a}{r_1} \text{ мкгн/м},$$

т. е. в данном случае

$$L_1 = 0,921 \lg \frac{1}{1,1} = 0,921 \cdot 0,903 = 0,83 \text{ мкгн/м}.$$

2. Определяем погонную емкость линии. Поскольку для воздуха

$$\epsilon_a = \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ ф/м} = \frac{10^3}{36\pi} \text{ пф/м},$$

формула (4.1) в применении к воздушной линии имеет вид

$$C_1 = \frac{\pi \epsilon_a}{\lg \frac{a}{r_1}} = \frac{\pi \cdot 10^3}{36\pi \cdot 2,3 \lg \frac{a}{r_1}} = \frac{12,1}{\lg \frac{a}{r_1}} \text{ пф/м}.$$

Если же линия заполнена диэлектриком с $\epsilon_a \neq \epsilon_0$, то в формулу нужно ввести относительную диэлектрическую проницаемость ϵ , т. е. теперь

$$C_1 = \frac{12,1\epsilon}{\lg \frac{a}{r_1}}.$$

В данном случае

$$C_1 = \frac{12,1 \cdot 1}{\lg \frac{16}{2}} = \frac{12,1}{0,903} = 13,4 \text{ пф/м}.$$

4.6. $L_1 = 1,47 \text{ мкгн/м}; C_1 = 7,6 \text{ пф/м}.$

4.7. $C_1 = 12,1 \text{ пф/м}; a = 15 \text{ мм}.$

4.8. $\epsilon = 2,5; L_1 = 0,921 \text{ мкгн/м}.$

4.10. $L_1 = 0,295 \text{ мкгн/м}; C_1 = 94 \text{ пф/м}.$

4.11. $D = 17,4 \text{ мм}; C_1 = 107 \text{ пф/м}.$

4.12. $Z_B = 276 \text{ ом}.$

4.13. $Z_B = 174,6 \text{ ом}.$

4. 14. $Z_B = 56,2 \text{ ом.}$

4. 15. $Z_B = 58,4 \text{ ом.}$

4. 16. $Z_B = 335,3 \text{ ом.}$

4. 18. Согласно рис. 34.

4. 19. $u_1 = [U_{m1}] \sin \omega t; \quad u_2 = [U_{m2} e^{\gamma}] \sin (\omega t + \psi);$

$$u_3 = [U_{m3} e^{\gamma + \theta} \sin \alpha x] \sin (\omega t + \vartheta).$$

4. 20. $\dot{I}_1 = [I_{m1}] e^{j\omega t}; \quad \dot{I}_2 = [I_{m2} e^{\beta}] e^{j(\omega t + \varphi_0)};$

$$\dot{I}_3 = [I_{m3} e^{\gamma} \cos \alpha x] e^{j(\omega t + \varphi_0 + 90^\circ)}.$$

4. 21. Для линии без потерь

$$u_x = U_{m1} \sin [\omega t - \beta(l - x)]; \quad i_x = I_{m1} \sin [\omega t - \beta(l - x)].$$

Для реальной линии

$$u_x = U_{m1} e^{-\alpha(l-x)} \sin [\omega t - \beta(l - x)];$$

$$i_x = I_{m1} e^{-\alpha(l-x)} \sin [\omega t - \beta(l - x)].$$

4. 23. 1. Из формулы погонной индуктивности коаксиальной линии

$$L_1 = 0,461 \lg \frac{D}{d}$$

находим

$$\lg \frac{D}{d} = \frac{L_1}{0,461} = \frac{0,26}{0,461} = 0,566,$$

откуда следует, что погонная емкость линии

$$C_1 = \frac{24,1 \varepsilon}{\lg \frac{D}{d}} = \frac{24,1 \cdot 2,5}{0,566} = 105,3 \text{ нФ/м.}$$

2. Волновое сопротивление линии согласно (4.4)

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{0,26 \cdot 10^{-6}}{105,3 \cdot 10^{-12}}} \approx 50 \text{ ом.}$$

3. Так как линия работает в режиме бегущих волн, то сопротивление нагрузки

$$R_2 = Z_B = 50 \text{ ом.}$$

4. Длина волны в кабеле λ_K прямо пропорциональна скорости распространения волн в нем и потому меньше, чем в воздухе, в $\sqrt{\varepsilon}$ раз, т. е.

$$\lambda_K = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{15}{\sqrt{2,25}} = 10 \text{ м.}$$

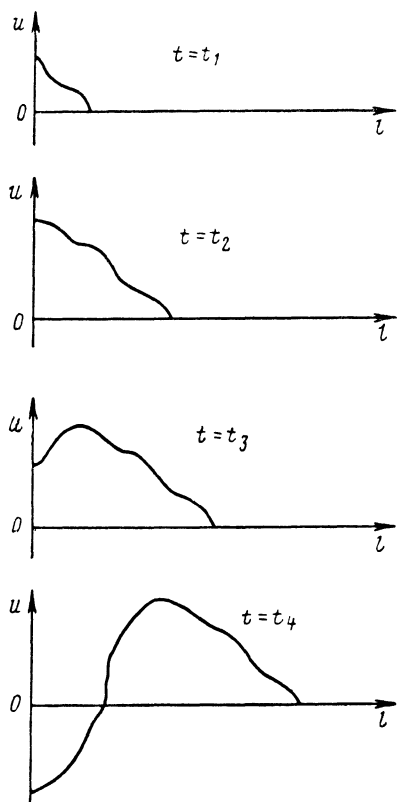


Рис. 34.

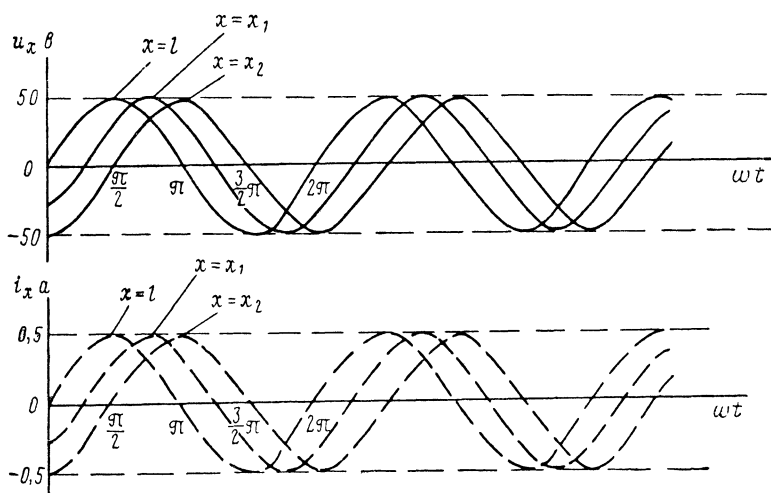


Рис. 35.

5. Коэффициент фазы в кабеле

$$\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda_k} = \frac{360}{\lambda_k} = 36^\circ \text{ рад/м.}$$

4.24. Поскольку линия идеальная и работает в режиме бегущих волн, пользуемся уравнениями (4.5) и подставляем в них

$$U_{m2} = U_{m1} = 50 \text{ в; } I_{m2} = \frac{U_{m2}}{Z_B} = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ а; } \beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \text{ рад/м;}$$

$$\beta x = \beta l = \frac{\pi}{2} \cdot 12 = 6\pi \quad (\text{для } x=l, \text{ т. е. для начала линии});$$

$$\beta x_1 = \beta(l - 0,5) = \frac{\pi}{2} \cdot 11,5 = \frac{23}{4} \pi \quad (\text{для } x=x_1=l - 0,5 = 11,5 \text{ м});$$

$$\beta x_2 = \beta(l - 1) = \frac{\pi}{2} \cdot 11 = 5,5\pi \quad (\text{для } x=x_2=l - 1 = 11 \text{ м}).$$

Расчет изменений напряжения и тока производится в пределах одного периода колебаний ($\omega t = 0 \div 2\pi$). Результаты расчета сведены в табл. 4 и иллюстрируются рис. 35.

4.25. Для вычисления амплитуды напряжения U_{mx} , действующего значения напряжения U_{ex} , амплитуды тока I_{mx} и действующего значения тока I_{ex} на расстояниях от конца кабеля x , равных 20, 18, 15, 10, 5, 0 м, пользуемся формулами

$$U_{mx} = U_{m1} e^{-\alpha(l-x)}; \quad U_{ex} = \frac{U_{mx}}{\sqrt{2}};$$

$$I_{ex} = \frac{I_{mx}}{\sqrt{2}}; \quad I_{mx} = \frac{U_{mx}}{Z_B},$$

где $U_{m1} = 100 \text{ в; } l = 20 \text{ м, } Z_B = 75 \text{ ом.}$

4.26. 1. Погонное активное сопротивление линии согласно (4.8)

$$R_1 = 2R'_1 = \frac{2 \cdot 4,16 \cdot 10^{-2} \sqrt{f}}{r} = \frac{2 \cdot 4,16 \cdot 10^{-2} \sqrt{20}}{2} = 0,186 \text{ ом/м.}$$

2. Коэффициент затухания на основании (4.7) равен

$$\alpha = \frac{R_1}{2Z_B} = \frac{0,186}{2 \cdot 600} = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ неп/м} = 13,45 \cdot 10^{-4} \text{ дб/м.}$$

3. Затухание, вносимое всей линией,

$$\alpha l = 1,55 \cdot 10^{-4} \cdot 50 = 7,74 \cdot 10^{-3} \text{ неп} = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ дб.}$$

4.27. $L_1 = 1,36 \text{ мкГн/м; } C_1 = 20,55 \text{ пф/м; } R_2 = 258 \text{ ом.}$

4.28. $R_1 = 0,175 \text{ ом/м; } \alpha l = 7,38 \cdot 10^{-2} \text{ дб.}$

4.29. $\alpha_k = 0,314 \text{ рад/м} = 18 \text{ град/м.}$

4.30. 1. Волновое сопротивление кабеля

$$Z_B = R_2 = 75 \text{ ом.}$$

x	$l, \text{ т. е. } \beta x=6\pi$					$x_1, \text{ т. е. } \beta x=\frac{23}{4}\pi$					$x_2, \text{ т. е. } \beta x=5,5\pi$				
ωt	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	2π	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	2π	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	2π
$\omega t + \beta x$	6π	$6,5\pi$	7π	$7,5\pi$	8π	$\frac{23}{4}\pi$	$\frac{25}{4}\pi$	$\frac{27}{4}\pi$	$\frac{29}{4}\pi$	$\frac{31}{4}\pi$	$5,5\pi$	6π	$6,5\pi$	7π	$7,5\pi$
$\sin(\omega t + \beta x)$	0	1	0	-1	0	-0,707	0,707	-0,707	0,707	-0,707	-1	0	1	0	-1
$U_x = U_{m2} \sin(\omega t + \beta x)$	0	50	0	-50	0	-35,3	35,3	-35,3	35,3	-35,3	-50	0	50	0	-50
$i_x = I_{m2} \sin(\omega t + \beta x)$	0	0,5	0	-0,5	0	-0,353	0,353	-0,353	0,353	-0,353	-0,5	0	0,5	0	-0,5

2. Погонное сопротивление проводов линии

$$R_1 = 2\alpha Z_B = 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 75 = 0,53 \text{ ом/м.}$$

Искомая длина волны определяется исходя из формулы

$$R_1 = \frac{0,72}{\sqrt{\lambda}} \left(\frac{1}{\frac{a}{2}} + \frac{1}{\frac{D}{2}} \right),$$

в которой первое слагаемое учитывает погонное активное сопротивление внутреннего провода, а второе слагаемое — погонное активное сопротивление внешнего провода

$$\lambda = \left(\frac{0,72}{R_1} \right)^2 \left(\frac{2}{a} + \frac{2}{D} \right)^2 = \left(\frac{0,72}{0,53} \right)^2 \left(\frac{1}{0,34} + \frac{1}{3,65} \right)^2 = 19,2 \text{ м.}$$

$$4.31. f = 296 \text{ МГц}; R_2 = 74,4 \text{ ом.}$$

4.34. Так как в режиме бегущих волн $R_2 = Z_B$, то в данном случае

$$R_2 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}},$$

а погонная индуктивность линии

$$L_1 = R_2^2 C_1 = 50^2 \cdot 125 \cdot 10^{-12} \text{ гн/м} = 0,312 \text{ мкгн/м.}$$

$$4.35. L_1 = 1,05 \text{ мкгн/м}; C_1 = 26,4 \text{ пф/м}; a = 20,7 \text{ мм.}$$

$$4.36. \alpha = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ дб/м.}$$

4.37. Определяем погонное активное сопротивление линии

$$R_1 = 2R'_1 = \frac{2 \cdot 0,72}{r \sqrt{\lambda}} = \frac{2 \cdot 0,72}{3 \sqrt{1}} = 0,48 \text{ ом/м}$$

и коэффициент затухания линии

$$\alpha = \frac{R_1}{2Z_B} = \frac{0,48}{2 \cdot 600} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ nep/м.}$$

В соответствии с этим коэффициент полезного действия линии (см. приложение VII)

$$\eta = \frac{1}{e^{2\alpha l}} = \frac{1}{e^{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 60}} \approx 0,95$$

и мощность, выделяемая в нагрузке,

$$P_2 = P_1 \eta = 100 \cdot 0,95 = 95 \text{ вт.}$$

$$4.38. \eta = 0,985.$$

4.40. Расчет производится на основании формул (4.9)

$$\begin{aligned} U_{mx} &= U_{m2} \cos \beta x = I_{mn} Z_B \cos \left(\frac{360}{\lambda} x \right)^\circ = 0,5 \cdot 50 \cos \left(\frac{360}{\lambda} x \right)^\circ = \\ &= 25 \cos \left(\frac{360}{\lambda} x \right)^\circ; \end{aligned}$$

$$I_{mx} = \frac{U_{m2}}{Z_B} \sin \beta x = I_{m2} \sin \left(\frac{360}{\lambda} x \right)^\circ = 0,5 \sin \left(\frac{360}{\lambda} x \right)^\circ.$$

4.41. Расчет производится по формулам (4.9) с использованием данных, полученных при решении задачи 4.40:

$$u_x = U_{mx} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{mx} \sin \left(\frac{360}{T} t + 90 \right)^\circ;$$

$$i_x = I_{mx} \sin \omega t = I_{mx} \sin \left(\frac{360}{T} t \right)^\circ.$$

4.42. $Z_{BX}=0$ (при $x=0,25; 1,25$ м) и $Z_{BX}=\infty$ (при $x=0,5; 1$ м) В первом случае на входе линии наблюдаются пучность тока и узел напряжения, а во втором — пучность напряжения и узел тока.

4.44. Входное сопротивление линии имеет емкостный характер;

$$Z_B = 98,5 \text{ ом.}$$

4.45. Индуктивное сопротивление катушки согласно (2.14)

$$x_L = \frac{1880L}{\lambda} = \frac{1880 \cdot 1}{10} = 188 \text{ ом.}$$

Минимальная длина линии x определяется из условия, что входное сопротивление линии $X_{BX}=x_L$, т. е. $-Z_B \operatorname{ctg} \beta x = x_L$, откуда электрическая длина линии

$$\beta x = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(-\frac{x_L}{Z_B} \right) = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(-\frac{188}{50} \right) = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} (-3,78) = 165^\circ 12',$$

а геометрическая длина линии

$$x = \frac{165^\circ 12'}{\alpha} = \frac{165^\circ 12' \lambda}{360^\circ} = \frac{165,2 \cdot 10}{360} = 4,6 \text{ м.}$$

Этот результат согласуется с тем, что разомкнутая линия имеет входное сопротивление индуктивного характера при длине $\frac{\lambda}{4} < x < \frac{\lambda}{2}$.

4.46. $L_{ЭВ} = 14,1$ мкГн.

4.47. $l = 5$ см.

4.48. 1. Коэффициент фазы

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{360}{2,5} = 144 \text{ град/м.}$$

2. Амплитуда тока в конце линии

$$I_{m2} = \frac{I_{mx}}{\cos \beta x} = \frac{100}{\cos (144 \cdot 5)^\circ} = 100 \text{ ма.}$$

3. Амплитудные значения напряжения и тока в различных сечениях линии определяются по формулам

$$U_{mx} = I_{m2} Z_B \sin \beta x; \quad I_{mx} = I_{m2} \cos \beta x.$$

Результаты расчета U_{mx} и I_{mx} сведены в табл. 5 и иллюстрируются графиком на рис. 36.

Таблица 5

x в м	0,000	0,208	0,417	0,625	0,833	1,250	1,875	2,500
$(\beta x)^\circ$	0	30	60	90	120	180	270	360
$\sin \beta x$	0,000	0,500	0,866	1,000	0,866	0,000	-1,000	0,000
$\cos \beta x$	1,000	0,866	0,500	0,000	-0,500	-1,000	0,000	1,000
U_{mx} в в	0,0	3,5	6,06	7,0	6,06	0,0	-7,0	0,0
I_{mx} в ма	100,0	86,6	50,0	0,0	-50,0	-100,0	0,0	100,0

4. 49. Изменения напряжений и токов в линии отражены в табл. 6 и показаны на рис. 37.

Таблица 6

$\begin{matrix} x \\ t \end{matrix}$	Напряжение u_x						Ток i_x					
	0	$\frac{\lambda}{8}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	$\frac{3}{4}\lambda$	λ	0	$\frac{\lambda}{8}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	$\frac{3}{4}\lambda$	λ
	Амплитуда напряжения U_{mx}						Амплитуда тока I_{mx}					
	0	141	200	0	-200	0	1	0,71	0	-1	0	1
0	0	141	200	0	-200	0	0	0	0	0	0	0
$\frac{T}{8}$	0	99,7	141	0	-141	0	0,71	0,5	0	-0,71	0	0,71
$\frac{T}{4}$	0	0	0	0	0	0	1	0,71	0	-1	0	1
$\frac{T}{2}$	0	-141	-200	0	200	0	0	0	0	0	0	0
$\frac{5}{8}T$	0	-99,7	-141	0	141	0	-0,71	-0,5	0	-0,71	0	-0,71
$\frac{3}{4}T$	0	0	0	0	0	0	-1	-0,71	0	1	0	-1
T	0	141	200	0	-200	0	0	0	0	0	0	0

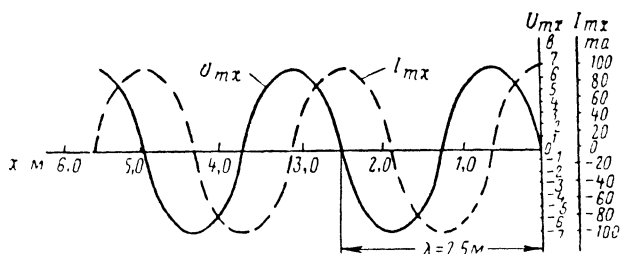


Рис. 36.

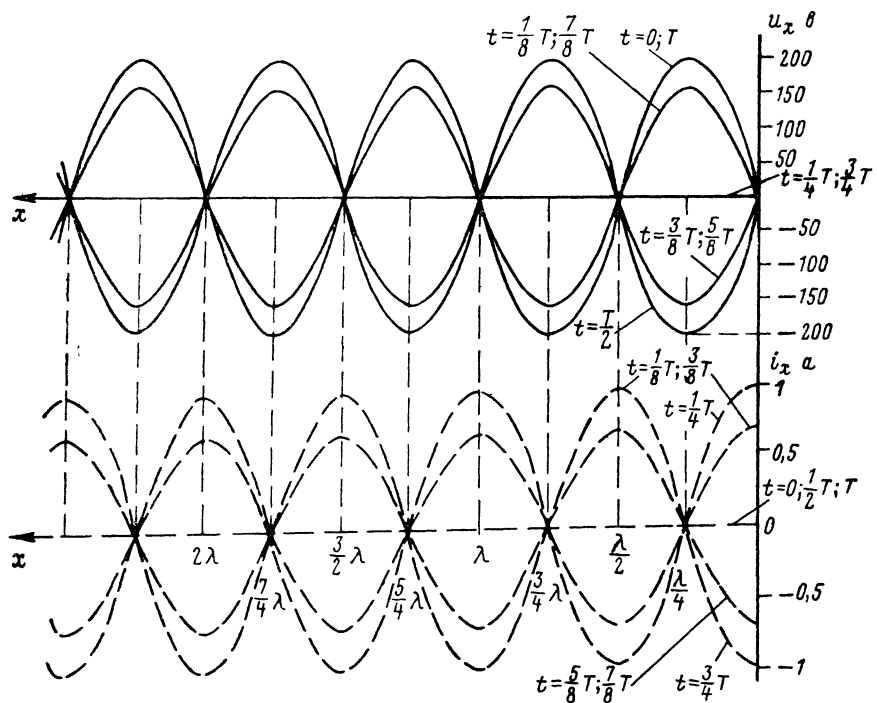


Рис. 37.

4. 50. В воздушной линии пучности напряжения и узлы тока получаются при $x=1,25; 3,75; 6,25; 8,75$, а пучности тока и узлы напряжения — при $x=0; 2,5; 5; 7,5; 10$ м. В линии с диэлектрическим заполнением — соответственно при $x=0,83; 2,5; 4,16; 5,83; 7,49; 9,16$ и при $x=0; 1,67; 3,33; 5; 6,67; 8,33; 10$ м.

4. 51. Результаты расчета сведены в табл. 7 и иллюстрируются на рис. 38.

Таблица 7

x в м	0,000	0,208	0,417	0,625
$(\beta x)^\circ$	0	30	60	90
$\operatorname{tg} \beta x$	0,00	0,58	1,73	∞
$Z_{\theta x} = jZ_B \operatorname{tg} \beta x$ в ом	0,0	$j40,6$	$j121,1$	∞

Продолжение

x в м	0,833	1,250	1,875	2,500
$(\beta x)^\circ$	120	180	270	360
$\operatorname{tg} \beta x$	$-1,73$	0,00	∞	0,00
$Z_{\theta x} = jZ_B \operatorname{tg} \beta x$ в ом	$-j121,1$	0,0	∞	0,0

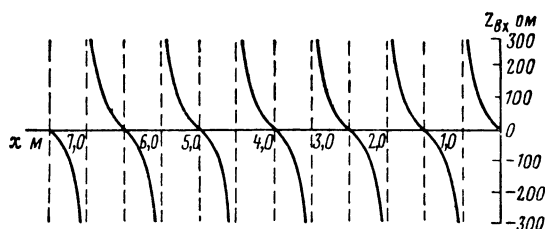


Рис. 38.

4. 52. 1. Длина волны в воздухе, соответствующая частоте 50 МГц,

$$\lambda = \frac{300}{f} = \frac{300}{50} = 6 \text{ м.}$$

2. Длина волны в кабеле определяется с учетом того, что скорость распространения волн в нем меньше, чем в воздухе, в

$$\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{2,3} = 1,52 \text{ раза,}$$

т. е.

$$\lambda_k = \lambda / \sqrt{\varepsilon} = \frac{6}{1,52} \approx 4 \text{ м.}$$

3. Коэффициент фазы для кабеля

$$\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda_k} = \frac{360}{4} = 90 \text{ град/м.}$$

4. Входное сопротивление кабеля определяем для длины линии $x = 14,5 - k \frac{\lambda_k}{2} = 14,5 - 7 \cdot 2 = 0,5 \text{ м}$, поскольку входное сопротивление через участки линии, равные целому числу полуволн, повторяется:

$$X_{\text{вх}} = Z_{\text{в}} \operatorname{tg}(\beta_k x) = 75 \operatorname{tg}(90 \cdot 0,5)^\circ = 75 \text{ ом.}$$

Это сопротивление индуктивного характера.

4. 53. $C_0 = 34 \text{ нф.}$

4. 54. $f = 4,12 \text{ МГц.}$

4. 55. 1. Длина волны в воздухе

$$\lambda = \lambda_k \sqrt{\varepsilon} = 40 \sqrt{2,3} = 60,8 \text{ м.}$$

2. Сопротивление нагрузки

$$X_2 = \frac{1880 \cdot 10}{60,8} = 309,2 \text{ ом.}$$

3. Расстояние от конца линии до ближайшего резонансного сечения согласно (4.15)

$$l' = \frac{1}{\beta_k} \arccos \frac{X_2}{\sqrt{X_2^2 + Z_{\text{в}}^2}} = \frac{40}{360} \arccos \frac{309,2}{\sqrt{309,2^2 + 70^2}} = 1,11 \text{ м.}$$

4. Амплитуда напряжения в пучности

$$U_{m \Pi} = U_{m2} \frac{\sqrt{X_2^2 + Z_{\text{в}}^2}}{X_2} = 100 \frac{\sqrt{309,2^2 + 70^2}}{309,2} = 101 \text{ в.}$$

5. Амплитуда тока в пучности

$$I_{m \Pi} = \frac{U_{m2}}{Z_{\text{в}}} \frac{\sqrt{X_2^2 + Z_{\text{в}}^2}}{X_2} = \frac{U_{m \Pi}}{Z_{\text{в}}} = \frac{101}{70} = 1,44 \text{ а.}$$

6. Амплитуда тока в нагрузке

$$I_{m2} = \frac{U_{m2}}{X_2} = \frac{100}{309,2} = 0,32 \text{ а.}$$

4. 56. $L = 0,69 \text{ мкГн.}$

4. 57. $U_{m2} = 27,3 \text{ в.}$

4. 58. $U_{m \Pi} = 40,7 \text{ в; } l' = 18 \text{ см.}$

4. 59, 4. 60. Результаты расчета приведены в табл. 8.

Таблица 8

x в м	0	0,25	0,5	1
I_{mx} в а	-0,5	-0,49	-0,40	0
U_{mx} в в	13,44	-4,89	-23,62	40,7

4. 61. $l' = 6,27$ м.

4. 62. $X_{вх} = -7,8$ ом.

4. 63. $L = 0,15$ мкГн.

4. 64. 1. Коэффициенты бегущих и стоячих волн

$$k_{6.в} = \frac{Z_в}{R_2} = \frac{600}{1500} = 0,4;$$

$$k_{с.в} = \frac{1}{k_{6.в}} = \frac{1}{0,4} = 2,5.$$

2. Амплитуды напряжения и тока бегущих волн

$$U_{m6} = k_{6.в} U_{m2} = k_{6.в} U_{m1} = 0,4 \cdot 10^3 = 400 \text{ в};$$

$$I_{m6} = \frac{U_{m6}}{Z_в} = \frac{400}{600} = 0,67 \text{ а.}$$

3. Амплитуды напряжения и тока стоячих волн в пучностях

$$U_{mc} = (1 - k_{6.в}) U_{m2} = 0,6 \cdot 10^3 = 600 \text{ в};$$

$$I_{mc} = \frac{U_{mc}}{Z_в} = \frac{600}{600} = 1 \text{ а.}$$

4. Максимальные амплитуды напряжения и тока результирующей волны

$$U_{mp \max} = U_{m6} + U_{mc} = 400 + 600 = 1000 \text{ в};$$

$$I_{mp \max} = I_{m6} + I_{mc} = 0,67 + 1 = 1,67 \text{ а.}$$

5. Минимальные амплитуды напряжения и тока результирующей волны

$$U_{mp \min} = U_{m6} = 400 \text{ в};$$

$$I_{mp \min} = I_{m6} = 0,67 \text{ а.}$$

4. 67. Подставив $\beta x = \frac{360 \cdot x}{\lambda} = \frac{360 \cdot 15}{100} = 54^\circ$;

$R_2 = 100$ ом; $X_2 = 300$ ом; $Z_в = 500$ ом в формулы (4. 20), (4. 21). получим

$$R_{вх} = \frac{102 \cdot 25 \cdot 10^4}{25 \cdot 10^4 \cos^2(54^\circ) + (10^4 + 9 \cdot 10^4) \sin^2(54^\circ) - 500 \cdot 300 \sin 108^\circ} = 2747 \text{ ом.}$$

$$X_{\text{вх}} = 500 \frac{(25 \cdot 10^4 - 10^4 - 9 \cdot 10^4) \sin 54^\circ \cos 54^\circ + 500 \cdot 300 \cos 108^\circ}{25 \cdot 10^4 \cos^2 54^\circ + (10^4 + 9 \cdot 10^4) \sin^2 54^\circ - 500 \cdot 300 \sin 108^\circ} = 1366 \text{ ом.}$$

Таким образом, входное сопротивление кабеля

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}} = (2747 + j1366) \text{ ом.}$$

4. 68. $Z_{\text{вх}} = (2,6 - j14,8) \text{ ом.}$

4. 69. $x < \frac{\lambda}{4}.$

4. 72. Результаты расчета, произведенного по формуле (4.22), приведены в табл. 9.

Таблица 9

$k_{\text{д.с}}$	0	0,07	0,15	0,25	0,4	0,55	0,70	0,9	1,0
$k_{\text{с.с}}$	∞	14,3	6,7	4,0	2,5	1,8	1,4	1,1	1,0
ρ	1	0,91	0,74	0,61	0,43	0,29	0,23	0,05	0

4. 73. а) Вектор $\dot{p}$ сливается в точку в центре диаграммы (рис. 39); б) вектор коэффициента отражения имеет длину ρ_0 , равную 0,2, и угол $\varphi = \varphi_1 - 2\beta x = \varphi_1 - \left(\frac{720x}{\lambda}\right)^\circ = 20 - 720 \cdot 0,15 = -88^\circ$;

в) вектор $\dot{p}$ имеет длину 0,7 и угол $\varphi = -35 - 720 \cdot 0,4 = -323^\circ$;

г) вектор $\dot{p}$ имеет длину 1 и угол

$$\varphi = -720 \cdot 0,6 = -432^\circ = -360^\circ - 72^\circ.$$

4. 75. Полное сопротивление и полная проводимость одной и той же цепи изображаются на круговой диаграмме точками, симметричными относительно центра диаграммы. Это следует из того, что нормированное входное сопротивление четвертьволновой линии равно нормированной проводимости ее нагрузки. Для доказательства подставим $x = \lambda/4$ в формулу входного сопротивления линии без потерь (4.19)

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}} &= Z_{\text{в}} \frac{Z_2 + jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \beta x}{Z_{\text{в}} + jZ_2 \operatorname{tg} \beta x} = Z_{\text{в}} \frac{\frac{Z_2}{\operatorname{tg} \beta x} + jZ_{\text{в}}}{\frac{Z_{\text{в}}}{\operatorname{tg} \beta x} + jZ_2} = \\ &= Z_{\text{в}} \frac{\frac{Z_2}{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} \right)} + jZ_{\text{в}}}{\frac{Z_{\text{в}}}{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} \right)} + jZ_2} = \frac{Z_{\text{в}}^2}{Z_2}. \end{aligned}$$

Отсюда получим, что нормированное входное сопротивление четвертьволновой линии равно нормированной проводимости ее нагрузки:

$$z_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_{\text{в}}} = \frac{Z_{\text{в}}}{Z_2} = \frac{1}{z_2}.$$

Это свойство круговых диаграмм позволяет решить данную задачу следующим образом: находим на круговой диаграмме (рис. 40) точку a пересечения окружностей, соответствующих $r_{\text{вх}} = 1,2$ и $x_{\text{вх}} = 0,85$, полагая при этом, что $z = 1,2 + j0,85$ и является нормированным сопротивлением нагрузки линии. Так как речь идет о четвертьволновой линии, то по окружности постоянного $k_{\text{с.в}} = 2,2$, проходящей через точку a , совершаем поворот на 180° (в данном случае $2\beta x = 2 \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \pi$) до точки b . Эта точка определяет входное сопротивление линии, а следовательно, и проводимость нагрузки:

$$y = 0,56 - j0,4.$$

К такому же результату приходим непосредственным вычислением

$$y = \frac{1}{z} = \frac{1}{(1,2 + j0,85)} \cdot \frac{1,2 - j0,85}{(1,2 - j0,85)} = \frac{1,2 - j0,85}{1,2^2 + 0,85^2} = 0,56 - j0,4.$$

4. 76. $y = 1,72 + j0,69$.

4. 77. $z = 0,2 - j0,8$.

4. 78. 1. Определяем нормированное сопротивление нагрузки:

$$z_2 = \frac{Z_2}{Z_{\text{в}}} = \frac{R_2 + jX_2}{Z_{\text{в}}} = 2 + j4.$$

2. Находим на круговой диаграмме (рис. 41) точку пересечения $2'$ окружностей, соответствующих $r_2 = 2$ и $x_2 = 4$. Устанавливаем, что при этом $k_{\text{с.в}} = 10$.

3. Проводим прямую линию $1-3'$ через центр диаграммы и точку $2'$. Эта линия на шкале $\varnothing$ определяет исходный фазовый угол φ , соответствующий $0,218\lambda$.

4. Поворачиваем прямую $1-3'$ по часовой стрелке (к генератору) на угол, соответствующий $\frac{x}{\lambda} = 0,2$ до положения $1-4'$, в котором прямая пересекает шкалу $\varnothing$ на риске $0,218 + 0,2 = 0,418$ длин волн.

5. Отмечаем точку $5'$, в которой прямая $1-4'$ пересекает окружность постоянного $k_{\text{с.в}} = 10$. Эта точка соответствует нормированному входному сопротивлению

$$z_{\text{вх}} = 0,13 - j0,57.$$

6. Определяем входное сопротивление линии

$$Z_{\text{вх}} = z_{\text{вх}} Z_{\text{в}} = (0,13 - j0,57) \cdot 75 = (9,75 - j42,75) \text{ ом}.$$



координатам точки F пересечения линии AE с окружностью $k_{б.в} = 0,14$

$$y_{вх} = 0,15 + j0,21.$$

6. Определяем полную входную проводимость

$$Y_{вх} = y'_{вх} \frac{1}{Z_B} = (0,15 + j0,21) \cdot 0,01 = (0,0015 + j0,0021) \text{ 1/ом.}$$

4. 81. $Y_{вх} = (2 - j7,2) \cdot 10^{-4} \text{ 1/ом.}$

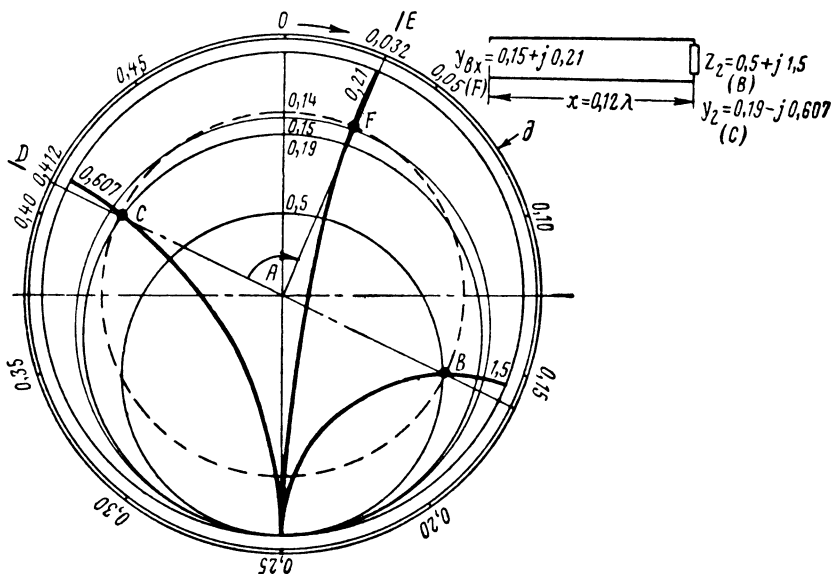


Рис. 42.

4. 82. 1. Находим на круговой диаграмме (рис. 43) точку B соответствующую минимуму напряжения при $k_{б.в} = 0,2$. Очевидно, что эта точка расположена в верхней половине вертикальной оси диаграммы.

2. Проводим прямую линию AC через центр диаграммы и точку B и поворачиваем эту линию против часовой стрелки из исходного положения до $\frac{x}{\lambda} = \frac{15}{80} = 0,187$ по шкале ∂ . В новом положении линия обозначена AD . Направление вращения принято обратным по сравнению с предыдущими примерами, так как в данном случае движение совершается от промежуточного сечения линии к нагрузке, а не к генератору. Находим точку пересечения E окружности постоянного $k_{б.в} = 0,2$ с линией AD и определяем нормированное сопротивление нагрузки, соответствующее этой точке,

$$z_2 = 1,09 - j1,85.$$

3. Полное сопротивление нагрузки

$$Z_2 = z_2 Z_B = 125(1,09 - j1,85) = (136,25 - j231,25) \text{ Ом.}$$

4.83. $R_2=41,5 \text{ Ом}$; $X_2=31 \text{ Ом}$.

4.84. Так как в конце короткозамкнутой линии проводимость бесконечно велика, то исходной является нижняя точка круговой диаграммы ($0,25\lambda$ на рис. 44). Производим от этой точки поворот вдоль внешней окружности диаграммы по часовой стрелке (к гене-

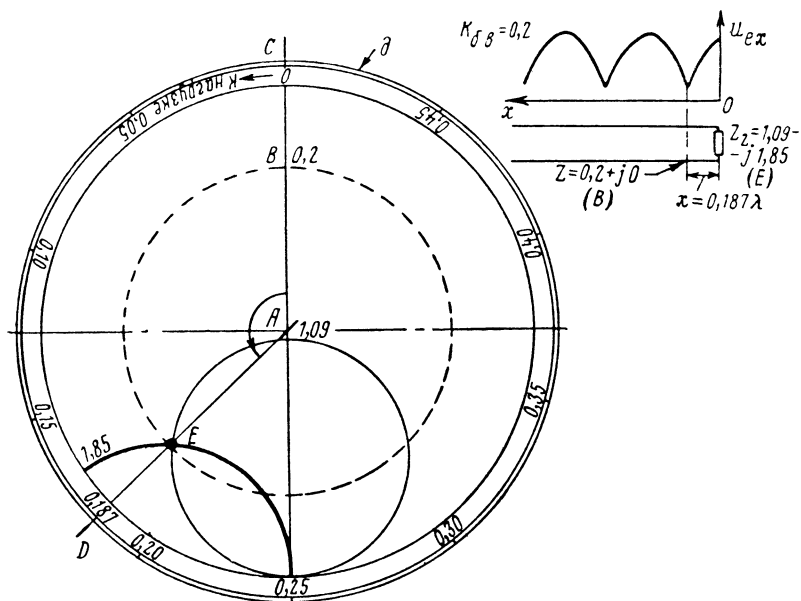


Рис. 43.

ратору) на величину $0,09\lambda$ шкалы ∂ , т. е. в положение $(0,25 + +0,09)\lambda = 0,34\lambda$. Искомая точка 2 соответствует нормированной проводимости

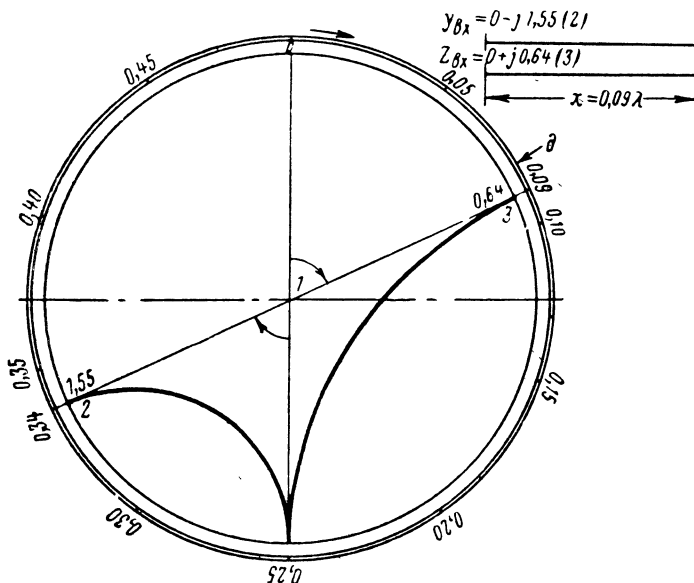
$$y_{BX} = 0 - j1,55,$$

а полная входная проводимость линии

$$Y_{\text{BX}} = \frac{1}{Z_{\text{B}}} y'_{\text{BX}} = 0,02(0 - j 1,55) = -j 0,031 \text{ л/о.н.}$$

4.85. $Y_{BX} = j1,56 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ом}$, т. е. входное сопротивление имеет емкостный характер и численно равно $\frac{10^3}{1,56} = 641 \text{ ом}$

$$\left(Z_{\text{BX}} = \frac{1}{j1,56 \cdot 10^{-3}} = -j641 \text{ Ом} \right).$$

$$z_{BY} = 0 + j0,64,$$
$$Z_{BX} = Z_B z_{BX} = j0,64 \cdot 75 = j48 \text{ Ом.}$$


Так как длина волны в воздухе

$$\lambda = \lambda_k \sqrt{\varepsilon} = 2\sqrt{2,3} = 3,04 \text{ м},$$

$$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{X_{\text{БХ}} \lambda}{1880} = \frac{Z_{\text{БХ}} \lambda}{i 1880} = \frac{48,3,04}{1880} = 0,078 \text{ мкВН.}$$

4.87. $C_{\text{ЭВБ}} = 10,4 \text{ нФ}$.

$$y_{\text{BX}} = j0,938,$$
$$Y_{\text{BX}} = \frac{1}{Z_{\text{B}}} l_{\text{BX}} = 0,005 \cdot j 0,938 = j 0,00469 \text{ 1/o.m.}$$

$$Z_{BX} = z_{BX} = -j1,06 \cdot 200 = -j212 \text{ Ом.}$$
[illegible]

утверждать, что данная линии эквивалентна некоторой емкости.

- 4.89. $C_{ЭКВ}=150 \text{ нф}$.
 4.91. $Z_{Б.С}=491 \text{ ом}$; $U_{m2}=125 \text{ в}$; $I_{m2}=0,2 \text{ а}$; $I_{m1}=0,25 \text{ а}$.
 4.92. Согласно формулам (4.24)

$$Z'_{B.C} = \sqrt{Z_{B1} \sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}} = \sqrt{50 \sqrt{50 \cdot 75}} = 55,5 \text{ Ом};$$

$$Z'_{B.C} = \sqrt{Z_{B2} \sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}} = \sqrt{75 \sqrt{50 \cdot 75}} = 67,6 \text{ Ом.}$$

4. 93. $Z_{B1}=46,7 \text{ Ом}; Z_{B2}=71,8 \text{ Ом}.$

- 4.94. 1. Определяем коэффициент b , характеризующий степень изменения параметров трансформатора, согласно формуле (4.26),

$$|b| = \frac{8\pi}{\lambda_{\max}} k_{\text{с.в}} = \frac{8\pi}{80} 1,1 = 0,345 \text{ 1/м.}$$

Таблица 10

x в M	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
b_x	0	0,069	0,138	0,207	0,276	0,345	0,414	0,483	0,552	0,661	0,690
e^{-b_x}	1	0,933	0,871	0,813	0,759	0,708	0,661	0,617	0,576	0,516	0,50
Z_{Bx} в OM	600	559,9	522,7	487,8	455,3	424,9	396,6	370,2	345,7	309,8	300
$\lg \frac{a_x}{r_1}$	2,17	2,03	1,89	1,77	1,65	1,54	1,44	1,34	1,25	1,12	1,086
$\frac{a_x}{r_1}$	148	107	77,7	58,9	44,7	34,7	27,7	21,9	17,8	13,2	12,3
a_x в MM	222	160,5	116,6	87,4	67,1	52,1	41,6	32,9	26,7	19,8	18,5

2. Определяем в соответствии с (4.27) длину трансформатора

$$l = \frac{2,3}{b} \lg \frac{Z_{B2}}{Z_{B1}} = \frac{2,3}{0,345} \lg \frac{600}{300} = 2 \text{ м.}$$

3. Определяем волновые сопротивления Z_B и расстояния между проводами a_x в различных сечениях трансформатора ($x=0, 2, 4 \dots 20 \text{ м}$). При этом имеем в виду, что крайние значения волновых сопротивлений равны 600 и 300 ом и для воздушной двухпроводной линии, являющейся к тому же экспоненциальным трансформатором, справедливы равенства:

$$Z_{Bx} = 276 \lg \frac{a_x}{r_1};$$

$$Z_{Bx} = Z_{B2} e^{-bx}.$$

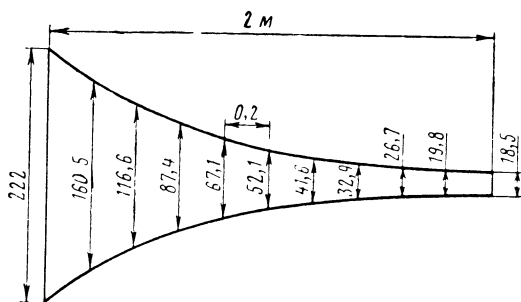


Рис. 46.

Результаты расчета приведены в табл. 10 и иллюстрируются рис. 46.

4. 95. $Z_{B1} = 700 \text{ ом}; Z_{B2} = 350 \text{ ом}; \text{ТФ} 2 \frac{700}{350}.$

4. 96. Как видно из приложения III, при $p_{\max} = 0,02$ и $N = \frac{Z_{B2}}{Z_{B1}} = \frac{150}{50} = 3$ максимально допустимое отношение $\lambda_2/\lambda_1 = 1,4$, а в данном случае $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{7,5}{5} = 1,5$.

Следовательно, согласование двухступенчатым переходом ($n=2$) не может быть осуществлено. А при $n=3$ это возможно.

4. 97. Согласно приложению III при $n=2$,

$$N = \frac{Z_{B2}}{Z_{B1}} = \frac{600}{300} = 2 \text{ и } p_{\max} = 0,1 \text{ имеем}$$

$$\frac{Z'_B}{Z_{B1}} = 1,25, \quad \frac{Z'_B}{Z_{B1}} = 1,6; \quad \frac{l}{\lambda_2} = 0,134;$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{f_1}{f_2} = 2,725.$$

Следовательно,

$$Z'_B = 1,25 Z_{B1} = 1,25 \cdot 300 = 375 \text{ ом};$$

$$Z''_B = 1,6 Z_{B1} = 1,6 \cdot 300 = 480 \text{ ом};$$

$$l = 0,134 \lambda_2 = 0,134 \cdot 7,5 = 1,005 \text{ м} = 1005 \text{ мм};$$

$$f_1 = 2,725 f_2 = 2,725 \cdot 15 = 4,088 \text{ МГц}.$$

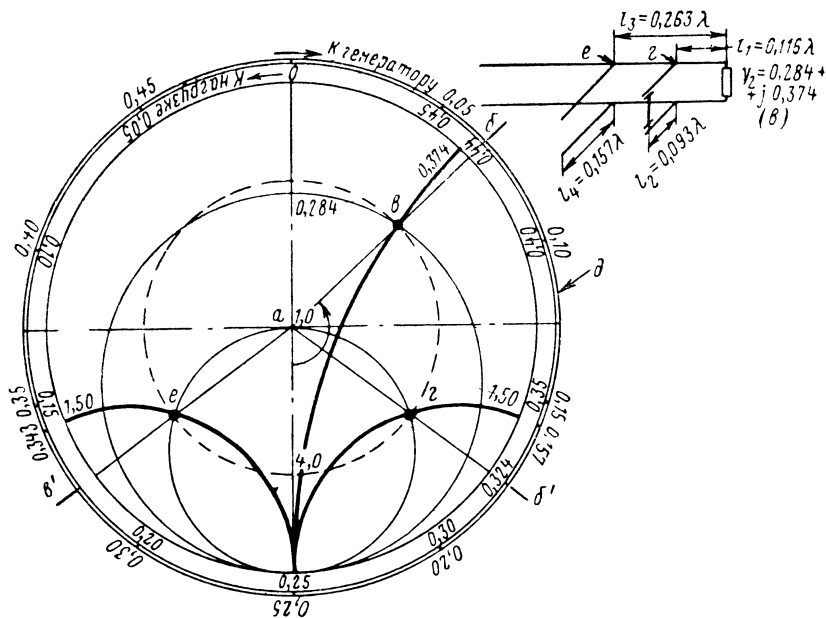


Рис. 47.

4. 98. Согласование возможно; $l = 0,45 \text{ м};$

$$Z'_B = 57,7 \text{ ом}; \quad Z''_B = 69,4 \text{ ом}.$$

4. 100. 1. От нижней точки окружности постоянного $k_{с.в} = 4$ (рис. 47) совершаем поворот против часовой стрелки (к нагрузке) на $0,19\lambda$ и проводим прямую ab , соединяющую центр диаграммы с меткой $0,25 + 0,19 = 0,44\lambda$ на шкале d . Затем находим нормированную проводимость нагрузки по точке b пересечения линии ab с окружностью постоянного $k_{с.в} = 4$

$$y_2 = 0,284 + j0,374.$$

2. Определяем расстояние l_1 от нагрузки до сечения линии с входной проводимостью, равной волновой ($g=1$). Так как на данном участке линии $k_{с.в} = 4$, то для этого проводим прямые ли-

нии ab' и av' через точки пересечения $г$ и $е$ окружности постоянного $k_{с.в}=4$ и окружности постоянной активной проводимости $g=1$.

Наличие двух точек пересечения подтверждает возможность согласования при двух различных положениях шлейфа. Линия ab' пересекает шкалу δ в положении $0,324\lambda$, а линия av' — в положении $0,177\lambda$. Следовательно, в первом случае расстояние $l_1=0,44-0,324=0,116\lambda$; во втором случае $l_1=0,44-0,177=0,263\lambda$.

3. Определяем нормированную реактивную составляющую входной проводимости линии в месте подключения шлейфа.

Согласно положению точек $г$, $е$ на круговой диаграмме эта проводимость в первом случае $b_{вх}=1,5$, а во втором случае $b_{вх}=-1,5$.

Следовательно, в первом случае проводимость шлейфа должна быть индуктивной ($b_{шл}=-1,5$), а во втором случае — емкостной ($b_{шл}=+1,5$). Это значит, что при длине шлейфа $l_2 < \frac{\lambda}{4}$ первый

шлейф является короткозамкнутым, а второй — разомкнутым. Для определения длины короткозамкнутого шлейфа l_2 совершаем поворот вдоль внешней окружности диаграммы от ее нижней точки ($b=\infty$) по часовой стрелке (к генератору) до получения $b_{шл}=-1,5$. При этом линия вращения пересекает шкалу δ на метке $0,343\lambda$. Следовательно, длина шлейфа $l_2=0,343-0,25=0,093\lambda$. Во втором случае поворот начинают с верхней точки диаграммы ($b=0$) в направлении по часовой стрелке до пересечения с кривой постоянной реактивной проводимости $b=1,5$. Эта точка соответствует длине разомкнутого шлейфа $l_2=0,157\lambda$.

4. 101. $l_1=0,205\lambda$; $l_2=0,115\lambda$.

4. 102. 1. Определяем нормированную проводимость нагрузки

$$y_2 = \frac{Y_2}{g_b} = \frac{0,002 - j0,003}{0,01} = 0,2 - j0,3.$$

2. Находим на круговой диаграмме (рис. 48) точку 2, соответствующую этой проводимости ($k_{б.в}=0,18$), и соединяем линией 1—3 центр диаграммы с этой точкой.

3. Находим точку 5, соответствующую проводимости линии в сечении $вг$ без шлейфа Шл₂.

Данную задачу можно рассматривать как определение входной проводимости линии длиной $l_4=0,15\lambda$, замкнутой на нагрузку с проводимостью $y_2=0,2-j0,3$. Для этого необходимо повернуть линию 1—3 по часовой стрелке на $0,15\lambda$, т. е. до положения 1—4, соответствующего $0,451+0,15=0,6\lambda$ или $0,1\lambda$ и найти точку 5 на пересечении прямой 1—4 и окружности постоянного $k_{б.в}=0,18$. В точке 5 проводимость $y'_{вг} = g'_{вг} + jb'_{вг} = 0,27 + j0,71$.

4. Определим проводимость линии в сечении $вг$ при включенном шлейфе Шл₂. Величина этой проводимости находится в прямой связи с проводимостью линии в сечении $аб$. Последняя должна иметь активную составляющую, равную волновой проводимости, независимо от наличия и длины шлейфа Шл₁, так как этот шлейф вносит в линию (по сечению $аб$) только реактивную проводимость.

Следовательно, проводимость линии в сечении ab характеризуется на диаграмме окружностью постоянной $g=1$.

Участок основной линии от ab до $вг$ имеет длину $\frac{3}{8}\lambda$, а поэтому для характеристики проводимости в сечении $вг$ окружность $g=1$ следует повернуть относительно центра диаграммы на $\frac{3}{8}\lambda$ против часовой стрелки (к нагрузке). Для определения проводимо-

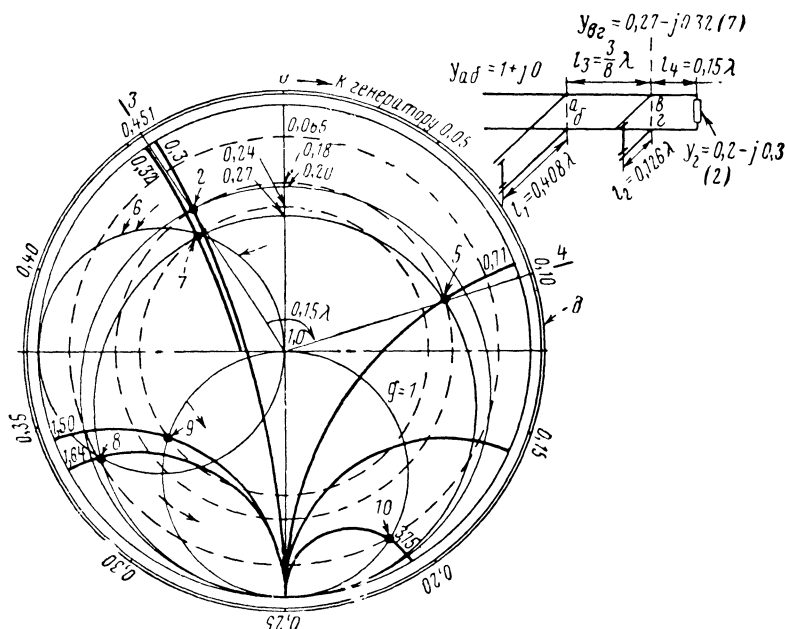


Рис. 48.

сти линии в сечении $вг$ при наличии шлейфа Шл₂ необходимо совершить переход от точки 5 к точкам вспомогательной окружности 6. Так как шлейф Шл₂ вносит в сечении $вг$ только реактивную проводимость (но влияет и на активную проводимость в других сечениях, в частности в ab), то в данном случае линией перехода является кривая постоянной активной проводимости $g=0,27$, через которую проходит точка 5.

В результате такого перехода находим две точки: точку 7, для которой $y_{82}=g_{82}+jb_{82}=0,27-j0,32$, и точку 8, для которой $y_{82}=0,27-j1,64$.

Определяем реактивную проводимость шлейфа Шл₂, как разность $b_{82}-b'_{82}$, которая для точки 7 равна $-0,32-0,71=-1,03$, а для точки 8 равна $-1,64-0,71=-2,35$.

5. Определим теперь полную проводимость линии в сечении ab

при выключенном шлейфе Шл₁. Имея в виду, что в данном случае $k_{\delta,в}$ в сечениях ab и $вг$ одинаковый, совершаем поворот на $\frac{3}{8} \lambda$ по линии постоянного $k_{\delta,в}=0,24$ и $k_{\delta,в}=0,065$ в направлении к генератору соответственно от точек 7 и 8 к точкам 9 и 10. Очевидно, что точки 9 и 10 находятся на окружности $g=1$. Искомая проводимость:

для точки 9 $y'_{a\delta}=g'_{a\delta}+jb'_{a\delta}=1-j1,55$, а для точки 10 $y'_{a\delta}=1+j3,75$.

Реактивная проводимость $b'_{a\delta}$ шлейфа Шл₁ для полной компенсации реактивной проводимости в сечении ab должна удовлетворять равенству $b'_{a\delta}=-b'_{a\delta}$, т. е. для точки 9 $b'_{a\delta}=1,55$, а для точки 10 $b'_{a\delta}=-3,75$.

При включении этих шлейфов результирующая проводимость в ab равна $y_{a\delta}=g_{a\delta}+jb_{a\delta}=1+j0$, что соответствует центру диаграммы.

6. Определим длину шлейфов вращением по часовой стрелке от нижней точки диаграммы ($g=\infty$) вдоль внешней окружности до получения требуемой реактивной проводимости. В результате получаем две комбинации шлейфов, имеющих длину:

$$l_1=0,408\lambda \ (b=1,55), \ l_2=0,126\lambda \ (b=-1,03);$$

$$l_1=0,042\lambda \ (b=-3,75), \ l_2=0,064\lambda \ (b=-2,35).$$

Вторая комбинация более приемлема, так как требует применения более коротких шлейфов.

4.103. 1. Определяем размер l изолятора:

$$l=0,25\lambda_0=\frac{0,25\lambda}{1,15}=0,2175\lambda.$$

2. Проводимость основной линии с волновым сопротивлением $Z_{в1}=100 \text{ ом}$, отнесенная к волновой проводимости металлического изолятора $\frac{1}{Z_{в2}}=\frac{1}{82} \text{ 1/ом}$, равна

$$y_{\partial e}=g_{\partial e}=0,01 \cdot 82=0,82.$$

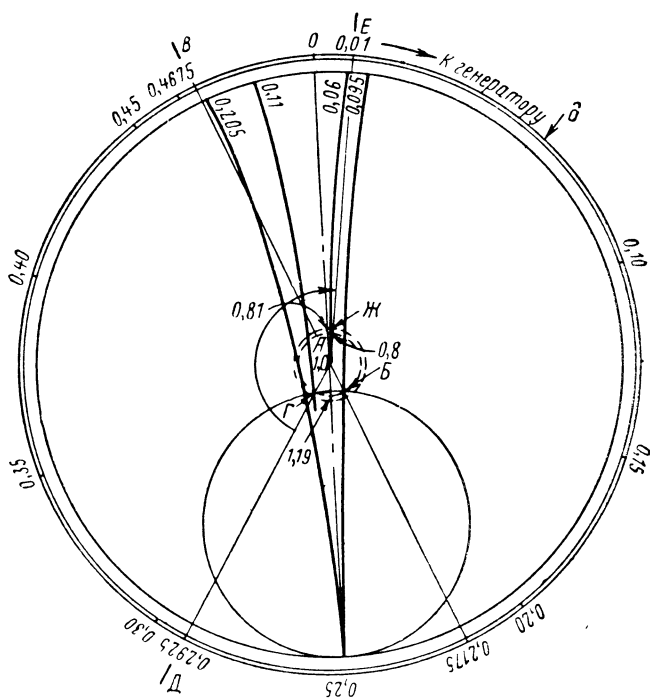
Эта нормированная проводимость отражена на круговой диаграмме (рис. 49) точкой А и соответствует нагрузке на диапазонный изолятор в сечении ∂e .

3. Определяем нормированную проводимость в сечении $вг$ со стороны линии $в-d$, $г-e$. Для этого совершаем поворот по часовой стрелке от А до В вдоль линии постоянного $k_{\delta,в}=0,82$ на угол, соответствующий $0,2175\lambda$. В точке В $y'_{гз}=1,19+j0,095$.

4. Определяем нормированную проводимость, вносимую короткозамкнутым шлейфом в сечение $вг$. Для этого совершаем поворот

по часовой стрелке вдоль внешней окружности диаграммы на $0,2175\lambda$ ($0,2500+0,2175=0,4675\lambda$) от нижней точки ($y=\infty$) до точки B . В этой точке

$$y''_{вг} = -j0,205.$$



Полная проводимость в сечении ab будет

$$Y_{ab} = \frac{1}{Z_{B2}} = \frac{0,81 + j0,06}{82} = (0,00989 + j0,000732) \text{ 1/ом},$$

т. е. весьма близкой к проводимости основной линии, что и требовалось доказать.

К ГЛАВЕ V

5.1. Из выражения мгновенного значения напряженности электрического поля

$$E = E_m \sin \omega t$$

находим мгновенное значение плотности тока смещения

$$\delta_{cm} = \varepsilon_a \frac{dE}{dt} = \varepsilon_a \omega E_m \cos \omega t,$$

полный ток смещения

$$i_{cm} = \delta_{cm} S = S \omega \varepsilon_a E_m \cos \omega t$$

и его амплитуду

$$I_{mcm} = \varepsilon_a \omega E_m S = \varepsilon_0 \omega E_m S.$$

Для частот $f = 50$ гц и $f = 50$ Мгц соответственно получаем

$$I_{mcm} = \varepsilon_0 2\pi f E_m S = \frac{6,28 \cdot 50 \cdot 10^8 \cdot 80 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 2,22 \text{ ма}.$$

$$I_{mcm} = \frac{6,28 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 10^8 \cdot 80 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 2,22 \cdot 10^3 \text{ а}.$$

5.2. $E_m = 3 \cdot 10^5$ в/м.

5.3. $E_m = 30$ кв/м.

5.4. В единице объема диэлектрика конденсатора заключено энергии электрического поля

$$\frac{\varepsilon_a E_e^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 E_m^2}{4} = \frac{9 \cdot 10^8}{4 \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 0,02 \text{ дж/м}^3.$$

Объем изоляции конденсатора

$$V = S(N-1)d = 50 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Среднее значение энергии электрического поля конденсатора

$$\frac{\varepsilon_0 E_e^2}{2} V = 0,02 \cdot 9 \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-7} \text{ дж}.$$

5.5. Коэффициент фазы

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \\ &= 6,28 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}} = 6,28 \text{ рад/м}. \end{aligned}$$

Амплитуда напряженности магнитного поля

$$H_m = \frac{E_m}{Z_0} = \frac{E_m}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} = \frac{10^{-2}}{377} = 27 \cdot 10^{-6} \text{ а/м.}$$

Мгновенное значение напряженности электрического поля

$$E = E_m \sin(\omega t - \beta x) = 10^{-2} \sin(18,8 \cdot 10^8 t - 6,28 x) \text{ в/м.}$$

Мгновенное значение напряженности магнитного поля

$$H = H_m \sin(\omega t - \beta x) = 27 \cdot 10^{-6} \sin(18,8 \cdot 10^8 t - 6,28 x) \text{ а/м.}$$

5. 6. $E = 2,26 \cdot 10^{-4} \sin(10^9 t - 5,7 x) \text{ в/м;}$

$$H = 10^{-6} \sin(10^9 t - 5,7 x) \text{ а/м.}$$

5. 7. $v = 1,73 \cdot 10^8 \text{ м/сек; } \beta = 3600 \text{ град/м;}$

$$f = 1,73 \cdot 10^9 \text{ ц.}$$

5. 8. $E_m = 0,1886 \text{ мв/м.}$

5. 9. $v = 2,12 \cdot 10^8 \text{ м/сек; } \beta = 170 \text{ град/м;}$

$$\lambda = 2,12 \text{ м; } Z_B = 267,3 \text{ ом.}$$

5. 10. При распространении волны в воздухе

$$v_1 = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек; } \lambda_1 = 30 \text{ м;}$$

$$\beta_1 = 12 \text{ град/м} = 0,21 \text{ рад/м, а в полиэтилене}$$

$$v_2 = 1,97 \cdot 10^8 \text{ м/сек; } \lambda_2 = 19,7 \text{ м;}$$

$$\beta_2 = 18,6 \text{ град/м} = 0,32 \text{ рад/м.}$$

5. 11. $\beta_1 = 72 \text{ град/м; } \beta_2 = 102 \text{ град/м.}$

5. 12. $H_e = 0,375 \text{ мка/м; } \Pi = 0,27 \cdot 10^{-10} \text{ вт/м}^2.$

5. 14. Волновое сопротивление среды

$$Z_B = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{9\epsilon_0}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \frac{377}{3} = 125,7 \text{ ом.}$$

Действующее значение напряженности электрического поля

$$E_e = \sqrt{\Pi Z_B} = \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 125,7} = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{ в/м} = 15,9 \text{ мв/м.}$$

Действующее значение напряженности магнитного поля

$$H_e = \frac{E_e}{Z_B} = \frac{15,9}{125,7} = 0,126 \text{ ма/м} = 126 \text{ мка/м.}$$

5. 15. $\Pi = 10,7 \cdot 10^{-8} \text{ вт/м}^2; E_m = 7,54 \text{ мв/м.}$

6. 1. При $f=10^4$ гц отношение

$$\frac{\delta_{\text{см}}}{\delta_{\text{пр}}} = \frac{\varepsilon_a \omega}{\gamma} = \frac{80 \cdot 2\pi \cdot 10^4}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 4} = 1,11 \cdot 10^{-5};$$

при $f=10^6$ гц отношение $\frac{\delta_{\text{см}}}{\delta_{\text{пр}}} = 1,11 \cdot 10^{-3};$

при $f=10^8$ гц отношение $\frac{\delta_{\text{см}}}{\delta_{\text{пр}}} = 0,11.$

6. 2. В морской воде $\frac{\delta_{\text{см}}}{\delta_{\text{пр}}} = 0,11$, а в сухой почве $\frac{\delta_{\text{см}}}{\delta_{\text{пр}}} = 22,2.$

6. 3. Показатели преломления первой и второй сред

$$n_1 = \sqrt{\varepsilon_1} = 1; \quad n_2 = \sqrt{\varepsilon_2} = \sqrt{2,3} = 1,52.$$

Углы отражения $\theta_{\text{отр}}$ и преломления $\theta_{\text{пр}}$ согласно (6. 3)

$$\theta_{\text{отр}} = \theta_{\text{пад}} = 0; \quad \sin \theta_{\text{пр}} = \frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{n_2/n_1} = \frac{0}{1,52} = 0, \quad \theta_{\text{пр}} = 0^\circ,$$

т. е. волны в обеих средах распространяются по нормали к плоскости раздела. Будем рассматривать эти среды как линии передачи с волновыми сопротивлениями

$$Z_{\text{в1}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_1}} = 377 \text{ ом}; \quad Z_{\text{в2}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_2}} = \frac{374}{1,52} = 248 \text{ ом}.$$

Следовательно, коэффициент бегущих волн в первой среде

$$k_{\text{б.в}} = Z_{\text{в2}}/Z_{\text{в1}} = 248/377 = 0,66.$$

6. 4. В первой среде распространяются бегущая волна с амплитудой напряженности электрического поля $E_{m \text{ б1}} = E_m k_{\text{б.в}} = 0,5 \cdot 0,66 = 0,33 \text{ мв/м}$ и стоячая волна с амплитудой $E_{m \text{ с1}} = E_m (1 - k_{\text{б.в}}) \sin(\beta_1 x) = 0,5 \cdot 0,34 \sin(0,21x) = 0,17 \sin(0,21x) \text{ мв/м}$, а во второй среде, поскольку она не ограничена в направлении распространения (т. е. по оси x), — бегущая волна с амплитудой $E_{m2} = E_m = 0,5 \text{ мв/м}$.

6. 5. $k_{\text{б.в}} = 0,705$.

6. 6. $E_{m \text{ б1}} = 188,5 \text{ мкв/м}$; $H_{m \text{ б1}} = 0,705 \text{ мка/м}$; $E_{m \text{ с1}} = 78,9 \times \cos(1,26x) \text{ мкв/м}$; $H_{m \text{ с1}} = 0,295 \sin(1,26x) \text{ мка/м}$; $E_{m2} = 188,5 \text{ мкв/м}$; $H_{m2} = 1 \text{ мка/м}$.

6. 7. $\theta_{\text{отр}} = 30^\circ$; $\theta_{\text{пр}} = 16^\circ 48'$; $\lambda_1 = 30 \text{ см}$; $\lambda_2 = 17,3 \text{ см}$.

6. 8. В результате отражения волн от проводящей плоскости в диэлектрике образуются стоячие волны с пучностями электрического поля и узлами магнитного поля на расстояниях $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots$ от границы раздела и узлами электрического поля и пуч-

ностями магнитного поля на расстояниях $x=0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \dots$. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ взаимно перпендикулярны (см. рис. 13).

6.9. Пучности электрического поля и узлы магнитного соответствуют $x=0,25; 0,75; 1,25$ м, а пучности магнитного поля и узлы электрического соответствуют $x=0; 0,5; 1; 1,5$ м.

6.10. Пучности электрического поля $E_{m\pi}=2E_{m\text{пад}}=200$ мВ/м и узлы магнитного $H_m=0$ расположены на расстояниях $x=1,25; 3,75; 6,25$ см; ..., а пучности магнитного поля $H_{m\pi}=E_{m\pi}/Z_{\text{в}}=200/188,5=1,066$ мА/м и узлы электрического $E_m=0$ соответствуют $x=0; 2,5; 5; 7,5$ см....

6.11. В пучностях электрического поля амплитуда $E_{m\pi}=2$ мВ/м, а в пучностях магнитного поля

$$H_{m\pi}=E_{m\pi}/Z_{\text{в}}=\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{377}=9,3\cdot 10^{-3}\text{ мА/м}=9,3\text{ мкА/м}.$$

6.12. Разделим обе части равенства (6.2), выражающего комплексную диэлектрическую проницаемость

$$\dot{\varepsilon}_a=\varepsilon_a-j\frac{\gamma}{\omega},$$

на диэлектрическую проницаемость воздуха $\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi\cdot 9\cdot 10^9}$ Дж/м и выразим ω через длину волны $\omega=2\pi f=2\pi c/\lambda=6\pi\cdot 10^8/\lambda$.

Тогда получим искомую зависимость

$$\dot{\varepsilon}=\varepsilon-j\frac{\gamma}{\omega\varepsilon_0}=\varepsilon-j\frac{\gamma\lambda\cdot 4\pi\cdot 9\cdot 10^9}{6\pi\cdot 10^8}=\varepsilon-j60\gamma\lambda. \quad (6.8)$$

6.13. Ток смещения больше тока проводимости в 417 раз, а $\dot{\varepsilon}=50-j0,12$.

6.14. Критической частотой ионизированного слоя $f_{\text{кр}}$ называется максимальная частота волны, которая способна отразиться от данного слоя. Для этой частоты угол падения $\theta_{\text{пад}}=0^\circ$, а показатель преломления отражающего слоя $n_2=0$. Соответственно получим, пользуясь формулой (6.4):

$$n_2=V\sqrt{\varepsilon_2}=\sqrt{1-80,8\frac{N}{f_{\text{кр}}^2}}=0,$$

где

$$N \text{ в эл/см}^3, \text{ а } f_{\text{кр}} \text{ в кГц}.$$

Откуда

$$f_{\text{кр}}=\sqrt{80,8N}\approx 9\sqrt{N}. \quad (6.9)$$

В данном примере $f_{\text{кр}}=9\sqrt{2,5\cdot 10^5}=45\cdot 10^2\text{ кГц}=4,5\text{ МГц}$,

а критическая длина волны $\lambda_{\text{кр}}=\frac{300}{f_{\text{кр}}}=\frac{300}{4,5}=66,6\text{ м}$.

6. 15. При $f=5$ МГц показатель преломления $n=0,44$; при $f=20$ МГц показатель преломления $n=0,97$.

6. 16. $n=0,98$ при $f=5$ МГц; $n=0,9970$ при $f=20$ МГц.

6. 17. $N=1,21 \cdot 10^6$ эл. см³.

6. 18. $\lambda_{\min}=30$ м при $\delta=90^\circ$; $\lambda_{\min}=15$ м при $\delta=30^\circ$; $\lambda_{\min}=26$ м при $\delta=60^\circ$; $\lambda_{\min}=5,2$ м при $\delta=10^\circ$.

6. 19. $D=22,6$ км (без учета рефракции); $D=26$ км (с учетом рефракции).

6. 20. $D=47$ км (без учета рефракции), $D=54,2$ км (с учетом рефракции).

К ГЛАВЕ VII

7. 1. $R_{\Sigma 0}=2$ ом; $R_{\text{по}}=8$ ом; $R_{\Sigma n}=0,89$ ом; $R_{\text{ш}}=3,56$ ом.

7. 2. $R_{\text{п}}=15$ ом; $R_{\text{а}}=20$ ом.

7. 5. Диаграмма направленности показана на рис. 15.

7. 6. 7° на уровне 0,5 по мощности (-3 дб).

7. 8. $D=2; 6; 10; 17; 20; 33$ дб. $G=1; 3; 9; 11,8; 30$ дб.

7. 9. $G=95$

7. 10. $R_{\text{п}}=2,34$ ом.

7. 13. $h_{\text{д}}=5$ м.

7. 14. $E=57,7$ мкв/м.

7. 15. $S_{\text{эфф}}=5$ м².

7. 16. $P=6,6 \cdot 10^{-14}$ вт.

К ГЛАВЕ VIII

8. 1. $E_m=18,8$ мв/м; $H_m=50$ мка/м; $\Pi=0,470$ мквт/м².

8. 2. Результаты расчета приведены в табл. 11.

Таблица 11

θ°	0	30	60
E_m в мв/м	0	9,4	16,3
H_m в мка/м	0	25	43,3
Π в мквт/м ²	0	0,118	0,353

8. 3. Действующее значение напряженности электрического поля

$$E_e = \sqrt{\Pi Z_0} = \sqrt{5 \cdot 10^{-10} \cdot 377} = 43,5 \cdot 10^{-5} \text{ в/м.}$$

Амплитуда напряженности электрического поля

$$E_m = \sqrt{2} E_e = 1,41 \cdot 43,5 \cdot 10^{-5} = 6,13 \cdot 10^{-4} \text{ в/м.}$$

Амплитуда напряженности магнитного поля

$$H_m = \frac{E_m}{Z_0} = \frac{6,13 \cdot 10^{-4}}{377} = 0,163 \cdot 10^{-5} \text{ а/м.}$$

Длина волны тока в вибраторе

$$\lambda = \frac{I_m l}{2rH_m} = \frac{20 \cdot 0,2}{2 \cdot 104 \cdot 0,163 \cdot 10^{-5}} = 122,6 \text{ м.}$$

Частота тока в вибраторе

$$f = \frac{300}{\lambda} = \frac{300}{122,6} = 2,447 \text{ мГц.}$$

8.4. Результаты расчета приведены в табл. 12.

Таблица 12

θ°	90	30	45
H_m в а/м	$25 \cdot 10^{-5}$	$12,5 \cdot 10^{-5}$	$17,7 \cdot 10^{-5}$
E_m в в/м	$94,25 \cdot 10^{-3}$	$47,13 \cdot 10^{-3}$	$66,63 \cdot 10^{-3}$
Π в вт/м ²	$11,78 \cdot 10^{-6}$	$29,45 \cdot 10^{-7}$	$5,89 \cdot 10^{-6}$

8.5. Результаты расчета приведены в табл. 13.

Таблица 13

θ°	90	30	15
H_m в а/м	$5,58 \cdot 10^{-5}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
E_m в в/м	$21,02 \cdot 10^{-3}$	$10,51 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-3}$

8.6. Поскольку в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) излучение элементарного вибратора наиболее интенсивно, то при $\theta = 90^\circ$ увеличение плотности потока мощности численно равно коэффициенту направленного действия $D = 1,5$. Для произвольного зенитного угла θ увеличение происходит в $DF^2(\theta)$, где $F(\theta)$ — уравнение нормированной диаграммы направленности по напряженности поля. В данном случае $F(\theta) = \sin \theta$, поэтому искомое увеличение плотности потока мощности $DF^2(\theta) = 1,5 \cdot 0,258^2 = 0,1$ для $\theta = 15^\circ$; $1,5 \times 0,5^2 = 0,38$ для $\theta = 30^\circ$; $1,5 \cdot 0,707^2 = 0,75$ для $\theta = 45^\circ$; $1,5 \cdot 0,866^2 = 1,13$ для $\theta = 60^\circ$.

$$8.7. E_e = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ в/м}; H_e = 7,48 \cdot 10^{-6} \text{ а/м}.$$

$$8.8. E_m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ в/м}; H_m = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ а/м}.$$

$$8.9. E_m = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ в/м}, H_m = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ а/м} \text{ при } \theta = 60^\circ; E_m = 2,508 \cdot 10^{-3} \text{ в/м}, H_m = 0,66 \cdot 10^{-5} \text{ а/м} \text{ при } \theta = 30^\circ.$$

$$8.10. I_e = 1,45 \text{ а}.$$

8.11. Плотность потока мощности полуволнового вибратора в экваториальной плоскости максимальна и равна

$$\Pi_{\max} = \frac{E_e^2}{Z_0} = \left(\frac{60 I_e}{r} \right)^2 \frac{1}{377},$$

а в произвольном направлении равна

$$\Pi = \Pi_{\max} F^2(\theta) = \left(\frac{60 I_e}{r} \right)^2 \frac{1}{377} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right]^2.$$

Отсюда находим расстояние

$$r = \frac{60 I_e}{\sqrt{\Pi \cdot 377}} \left[\frac{\cos(90 \cos 30^\circ)}{\sin 30^\circ} \right] = \frac{60 \cdot 15}{\sqrt{377 \cdot 10^{-7}}} \cdot \frac{\cos 77,94^\circ}{0,5} = 63 \text{ км}.$$

$$8.12. I_m = 0,72 \text{ а}.$$

8.13. Подставив $l = \lambda$ и $\theta = 90^\circ$ в формулу (8.3), получим

$$E_m = \frac{60 I_m \cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta\right) - \cos \frac{\pi l}{\lambda}}{r \sin \theta} = \frac{60 I_m}{r} \times \\ \times \frac{\cos\left(\frac{\pi \lambda}{\lambda} \cos 90^\circ\right) - \cos \frac{\pi \lambda}{\lambda}}{\sin 90^\circ} = \frac{120 I_m}{r}.$$

Отсюда находим амплитуду тока в пучности

$$I_{m \text{ п}} = \frac{E_m r}{120} = \frac{10^{-3} \cdot 240 \cdot 10^3}{120} = 2 \text{ а}.$$

8.14. Расчет диаграммы начинаем с определения направлений нулевого излучения ($\theta = \theta_0$). Из уравнения

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta\right) - \cos \frac{\pi l}{\lambda}}{\sin \theta}$$

получим, что $F(\theta) = 0$ при

$$\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta_0\right) - \cos \frac{\pi l}{\lambda} = 0 \text{ или } \frac{\pi l}{\lambda} = \frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta_0 + k\pi,$$

где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$

Это соответствует

$$\cos \theta_0 = \frac{\frac{\pi l}{\lambda} - k\pi}{\frac{\pi l}{\lambda}} = 1 - \frac{k\lambda}{l} = 1 - \frac{2}{3}k; \quad \cos \theta_0 = 1; \quad \cos \theta_0 = \frac{1}{3}$$

или

$$\theta_0 = 0^\circ; 70^\circ 32'.$$

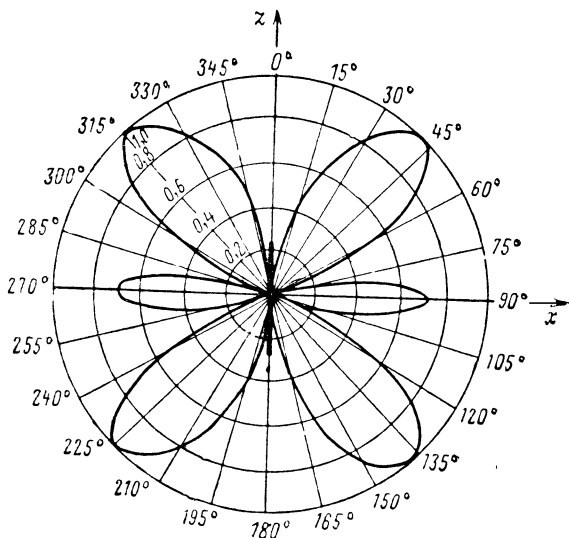


Рис. 50.

Имея в виду вычисленные направления нулевого излучения, задаемся различными значениями θ от 0 до 90° и определяем для них $F(\theta)$. Результаты расчета сводим в табл. 14 и строим диаграмму направленности (рис. 50).

$$\begin{aligned} 8.15. \quad & \left. \begin{array}{l} E_m = 0 \\ H_m = 0 \end{array} \right\} \text{ при } \delta = 0; \quad \left. \begin{array}{l} E_m = 5,29 \text{ мВ/м} \\ H_m = 14 \text{ мкА/м} \end{array} \right\} \text{ при } \delta = 5^\circ; \\ & \left. \begin{array}{l} E_m = 9 \text{ мВ/м} \\ H_m = 23,9 \text{ мкВ/м} \end{array} \right\} \text{ при } \delta = 10^\circ. \end{aligned}$$

8.16. Минимумы излучения получаются при разности хода волн $2h \sin \delta_0 = 0, \lambda, 2\lambda$ (это соответствует $\delta_0 = 0, 30, 90, 150, 180^\circ$), а максимумы излучения получаются при $2h \sin \delta_{\max} = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda$ (это соответствует $\delta_{\max} = 14^\circ 29'; 48^\circ 36'; 131^\circ 12'; 165^\circ 31'$). Число лепестков в диаграмме направленности вибратора в вертикальной плоскости равно четырем.

Таблица 14

θ°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	42°45'
$\cos \theta$	1	0,996	0,985	0,966	0,94	0,906	0,866	0,82	0,766	0,734
$\left(\frac{3}{2}\pi \cos \theta\right)=(270 \cos \theta)^\circ$	270	269	266	261	254	245	234	222	207	198
$\cos\left(\frac{3}{2}\pi \cos \theta\right)$	0	-0,017	-0,07	-0,156	-0,276	-0,423	-0,588	-0,743	-0,891	-0,949
$\sin \theta$	0	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423	0,5	0,574	0,643	0,679
$F(\theta)$	0	-0,195	-0,402	-0,603	-0,807	-1,000	-1,18	-1,29	-1,38	-1,399
$\frac{F(\theta)}{[F(\theta)]_{\max}}$	0	-0,139	-0,291	-0,431	-0,576	-0,714	-0,844	-0,922	-0,986	-1,00

Продолжение

θ°	45	50	55	60	65	70,5	75	80	85	90
$\cos \theta$	0,707	0,643	0,574	0,5	0,423	0,334	0,259	0,174	0,087	0
$\left(\frac{3}{2}\pi \cos \theta\right)=(270 \cos \theta)^\circ$	191	173,5	155	135	114	90	70	47	29,3	0
$\cos\left(\frac{3}{2}\pi \cos \theta\right)$	-0,982	-0,993	-0,906	-0,707	-0,407	0	0,342	0,682	0,871	1
$\sin \theta$	0,707	0,766	0,819	0,866	0,906	0,943	0,966	0,985	0,996	1
$F(\theta)$	-1,39	-1,29	-1,1	-0,816	-0,449	0	0,354	0,692	0,876	1
$\frac{F(\theta)}{[F(\theta)]_{\max}}$	-0,994	-0,922	-0,786	-0,583	-0,321	0	0,254	0,498	0,625	0,714

8. 17. Минимумы излучения получаются при $\Delta r = 0; \lambda; 2\lambda; 3\lambda; 4\lambda$, а максимумы — при $\Delta r = \frac{\lambda}{2}; \frac{3}{2}\lambda; \frac{5}{2}\lambda; \frac{7}{2}\lambda$. Число лепестков 8, т. е. равно числу четвертей длин волн, укладывающихся по высоте вибратора.

8. 19. Для построения нормированной диаграммы направленности пользуемся ее уравнением

$$F(\delta) = \sin(\beta h \sin \delta).$$

Направления нулевого излучения ($\delta = \delta_0$) определяются равенством

$$\sin(\beta h \sin \delta_0) = 0 \quad \text{или} \quad \beta h \sin \delta_0 = k\pi,$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$,

что при $h = \lambda$ соответствует

$$\sin \delta_0 = \frac{k\pi}{\beta h} = \frac{k\pi\lambda}{2\pi h} = \frac{k\lambda}{2h} = \frac{k}{2} = 0; \frac{1}{2}; 1 \quad \text{или} \quad \delta_0 = 0, 30, 90^\circ.$$

Направления максимального излучения ($\delta = \delta_{\max}$) соответствуют

$$\sin(\beta h \sin \delta_{\max}) = 1 \quad \text{или} \quad \beta h \sin \delta_{\max} = (2k + 1) \frac{\pi}{2},$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Отсюда следует, что при $h = \lambda$

$$\sin \delta_{\max} = \frac{(2k + 1)\pi}{2\beta h} = \frac{(2k + 1)\lambda}{4h} = \frac{2k + 1}{4} = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}$$

или

$$\delta_{\max} = 14^\circ 29'; 48^\circ 36'.$$

Вычисляем $F(\delta)$ для промежуточных значений угла δ . Результаты расчета сводим в табл. 15. Диаграмма направленности изображена на рис. 51.

Таблица 15

δ	0°	5°	10°	$14^\circ 30'$	20°	25°	30°
$\sin \delta$	0	0,087	0,174	0,25	0,342	0,423	0,5
$(2\pi \sin \delta) = (360 \sin \delta)^\circ$	0	31,4	62,6	90	124	152	180
$F(\delta)$	0	0,52	0,89	1	0,83	0,47	0

Продолжение

δ	35°	40°	45°	$48^\circ 40'$	50°	55°	60°
$\sin \delta$	0,574	0,643	0,707	0,75	0,766	0,82	0,865
$(2\pi \sin \delta) = (360 \sin \delta)^\circ$	207	231	254	270	276	296	312
$F(\delta)$	-0,45	-0,78	-0,96	-1	-0,99	-0,9	-0,74

δ	65°	70°	75°	80°	85°	90°
$\sin \delta$	0,906	0,94	0,965	0,984	0,996	1
$(2\pi \sin \delta) = (360 \sin \delta)^\circ$	326	338	348	354	358	360
$F(\delta)$	-0,56	-0,37	-0,21	0,1	-0,035	0

$$8. 20. E = \frac{120I_m}{r} \cdot \frac{\cos(\pi \sin \delta) + 1}{\cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta) \sin(\omega t - \beta r);$$

$$H = \frac{I_m}{\pi r} \cdot \frac{\cos(\pi \sin \delta) + 1}{\cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta) \sin(\omega t - \beta r);$$

$$F(\delta) = \frac{\cos(\pi \sin \delta) + 1}{\cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta).$$

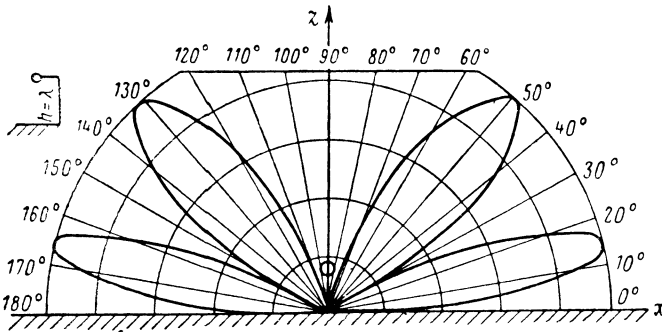


Рис. 51.

8. 21. Амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей четвертьволнового заземленного вибратора на поверхности земли благодаря отражению от нее волн в два раза больше, чем полуволнового симметричного вибратора в экваториальной плоскости:

$$E_{m \max} = \frac{120I_m}{r} = \frac{120 \cdot 1,2}{10^4} = 144 \cdot 10^{-4} \text{ в/м} = 14,4 \text{ мв/м};$$

$$H_{m \max} = \frac{E_{m \max}}{Z_0} = \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{377} = 38,2 \text{ мкв/м}.$$

Под углом места $\delta = 10^\circ$ согласно уравнению диаграммы направленности соответствующего симметричного (полуволнового) вибратора амплитуды напряженностей полей равны

$$E_m = E_{m \max} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \delta\right)}{\cos \delta} = 14,4 \frac{\cos(90 \cdot 0,1376)^\circ}{0,9848} = 14,1 \text{ мв/м};$$

$$H_m = H_{m \max} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \delta\right)}{\cos \delta} = 38,2 \frac{0,9632}{0,9848} = 37,3 \text{ мкА/м.}$$

8. 22. $h_{\lambda} \approx 0,5 \text{ м.}$

8. 23. $h_{\lambda} \approx 5 \text{ см.}$

8. 24. $h_{\lambda} \approx 30 \text{ м; } R_{\Sigma} = 9 \text{ ом.}$

8. 25. Исходя из действующих высот находим, что сопротивление излучения полуволнового симметричного и четвертьволнового заземленного вибраторов соответственно равны 81,1 ом и 40,6 ом, тогда как в действительности эти сопротивления 73,1 ом и 36,5 ом. Погрешность вычислений равна $\frac{81,1 - 73,1}{73,1} 100 = \frac{40,5 - 36,5}{36,5} 100 = 10,8\%$. Причина погрешности в том, что формула действующей высоты вибратора выведена исходя из эквивалентности данного и элементарного вибраторов в направлении их максимального излучения, а в остальных направлениях вследствие различия в диаграммах направленности эквивалентность вибраторов нарушается. Чем больше отличаются диаграммы направленности данного и элементарного вибраторов, тем менее точны формулы

$$R_{\Sigma 0} = 1600 \left(\frac{h_{\lambda}}{\lambda} \right)^2$$

и

$$R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_{\lambda}}{\lambda} \right)^2.$$

8. 26. При $\theta = 90^\circ$ — в 1,64 раза; при $\theta = 60^\circ$ — в 0,73 раза; при $\theta = 30^\circ$ в 0,28 раз.

8. 27. $R_{\Sigma 0} = 4 \text{ ом; } R_{\Sigma \Pi} = 1,38 \text{ ом.}$

8. 28. Реактивная составляющая входного сопротивления, поскольку вибратор настроен в резонанс, равна нулю, т. е.

$$x_{\text{вх}} = 0.$$

Волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{в.а}} = 120 \left(\ln \frac{l}{r} - 1 \right) = 120 \left(2,31 \lg \frac{15 \cdot 10^3}{5} - 1 \right) = 840 \text{ ом.}$$

Сопротивление излучения симметричного вибратора длиной $l = \lambda$ $R_{\Sigma \Pi} \approx 200 \text{ ом}$. Активная составляющая входного сопротивления вибратора равна

$$R_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{в.а}}^2}{R_{\Sigma \Pi}} = \frac{840^2}{200} = 3528 \text{ ом.}$$

8. 29. 1. Найдем действующую высоту антенны

$$h_{\lambda} = \frac{\lambda \operatorname{tg} \frac{\pi h}{\lambda}}{2\pi} = \frac{700 \operatorname{tg} \left(\frac{180 \cdot 30}{700} \right)^\circ}{6,28} = \frac{700 \operatorname{tg} (7,72)^\circ}{6,28} = 15,15 \text{ м}$$

и сопротивление излучения антенны

$$R_{\Sigma 0} = 1600 \left(\frac{h_A}{\lambda} \right)^2 = 1600 \left(\frac{15,15}{700} \right)^2 = 0,74 \text{ ом}.$$

Тогда активная составляющая входного сопротивления антенны

$$R_{\text{вх}} = R_a = R_{\Sigma 0} + R_n = 0,74 + 2 = 2,74 \text{ ом}.$$

2. Волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{в.а}} = 60 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi r} - 0,577 \right) = 60 \left(2,3 \lg \frac{700}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} - 0,577 \right) = 620,8 \text{ ом},$$

а реактивная составляющая входного сопротивления антенны

$$X_{\text{вх}} = X_a = -Z_{\text{в.а}} \operatorname{ctg} \beta h = -620,8 \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{360 \cdot 30}{700} \right)^\circ = -2260 \text{ ом}.$$

8.30. $R_{\text{вх}} = 1,14 \text{ ом}$; $X_{\text{вх}} = -2285,2 \text{ ом}$; $\eta_a = 56,1\%$.

8.31. Волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{в.а}} = 120 \left(\ln \frac{l}{r} - 1 \right) = 120 \left(2,3 \lg \frac{5 \cdot 10^3}{5} - 1 \right) = 708 \text{ ом}.$$

Укорочение вибратора

$$2\Delta l = \frac{42,5\lambda}{\pi Z_{\text{в.а}}} = \frac{42,5 \cdot 10}{3,14 \cdot 708} = 0,19 \text{ м}.$$

Геометрическая длина вибратора

$$l = \frac{\lambda}{2} - 2\Delta l = 5 - 0,19 = 4,81 \text{ м}.$$

8.32. Волновое сопротивление вибратора

$$\begin{aligned} Z_{\text{в.а}} &= 120 \left(\ln \frac{l}{r} - 1 \right) = 120 \left(2,3 \lg \frac{l}{r} - 1 \right) = \\ &= 120 \left(2,3 \lg \frac{2 \cdot 10^3}{4} - 1 \right) = 625 \text{ ом}. \end{aligned}$$

Действующая высота вибратора

$$h_A = 2 \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left(\frac{l}{2} \right)}{\beta} = \frac{2\lambda \operatorname{tg} \left(\frac{\pi l}{2\lambda} \right)}{2\pi} = \frac{2 \cdot 10 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{10} \right)}{\pi} = 1,03 \text{ м}.$$

Сопротивление излучения вибратора

$$R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_A}{\lambda} \right)^2 = 800 \left(\frac{1,03}{10} \right)^2 \approx 8 \text{ ом}.$$

Активная составляющая входного сопротивления вибратора

$$R_{\text{вх}} = R_{\Sigma} + R_n = 8 + 3 = 11 \text{ ом}.$$

Реактивная составляющая входного сопротивления вибратора

$$X_{вх} = -Z_{в.а} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{2} \right) = -625 \operatorname{ctg} \left(\frac{180 \cdot 2}{10} \right)^\circ = -860 \text{ ом}.$$

8. 34. $E_e = 31 \text{ мв/м}.$

8. 35. Излучаемая мощность

$$P_{\Sigma} = \frac{I_{m \Pi}^2 R_{\Sigma}}{2} = \frac{10^2 \cdot 36,5}{2} = 1780 \text{ вт} = 1,78 \text{ квт}.$$

Действующее значение напряженности электрического поля согласно (8.18)

$$E_e = \frac{245 \sqrt{P_{\Sigma} D}}{r} = \frac{245 \sqrt{1,78 \cdot 3,28}}{250} = 2,37 \text{ мв/м},$$

где $D = 1,64 \cdot 2 = 3,28$ — коэффициент направленного действия четвертьволнового заземленного вибратора.

8. 36. Определяем сопротивление излучения

$$R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_{\lambda}}{\lambda} \right)^2 = 800 \left(\frac{0,05}{1} \right)^2 = \frac{800 \cdot 25}{10^4} = 2 \text{ ом},$$

где $h_{\lambda} \approx \frac{l}{2} = 5 \text{ см}$, поскольку $l \ll \lambda$.

Коэффициент направленного действия в соответствии с (8.10), равен

$$D = \frac{120 \pi^2 \left(\frac{h_{\lambda}}{\lambda} \right)^2}{R_{\Sigma}} \approx \frac{120 \cdot 10 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}{2} \approx 6 \cdot 0,25 = 1,5.$$

Определяем действующее значение напряженности электрического поля

$$E_e = \frac{173 \sqrt{P_{\Sigma} D}}{r} = \frac{173 \sqrt{10 \cdot 1,5}}{10} = 62 \text{ мв/м}.$$

8. 37. $E_m = 64 \text{ мв/м}.$

8. 38. $E'_m = 7,2 \text{ мв/м}; E''_m = 0.$

8. 40. Диаграмма рассчитывается по уравнению

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi) = \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi \right)}{\sin \varphi} \cdot \frac{\sin \left(\frac{p\pi}{2} \cos \varphi \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi \right)}.$$

Антенна не излучает в направлениях, соответствующих

$$\cos \varphi_0 = \frac{2k}{p} = \frac{k}{4}, \text{ где } k = 1, 2, 3, 4.$$

Отсюда

$$\varphi_0 = 0^\circ; 41^\circ 36'; 60^\circ; 75^\circ 34'.$$

Составляем таблицу расчета диаграммы направленности (табл. 16).

Таблица 16

φ	0°	5°	10°	15°	20°	25°
$\sin \varphi$	0,000	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423
$\cos \varphi$	1,000	0,996	0,985	0,966	0,940	0,906
$\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)^\circ$	90,0	89,6	88,6	86,9	84,6	81,5
$\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)$	0,000	0,010	0,024	0,052	0,094	0,148
$F_1(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)}{\sin \varphi}$	0,000	0,115	0,138	0,180	0,275	0,350
$\left(\frac{p\pi}{2} \cos \varphi\right)^\circ$	720	717	709	695	677	652
$\sin\left(\frac{p\pi}{2} \cos \varphi\right)$	0,000	-0,052	-0,191	-0,422	-0,68	-0,926
$\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)$	1,000	1,000	0,999	0,998	0,995	0,989
$F_2(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{p\pi}{2} \cos \varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)}$	0,000	-0,052	-0,191	-0,423	-0,683	-0,935
$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi)$	0,000	-0,006	-0,025	-0,078	-0,188	-0,327
$\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$	0,000	-0,00075	-0,0031	-0,0097	-0,0232	-0,0439

Продолжение

φ	30°	35°	41°36'	45°	50°	55°	60°
$\sin \varphi$	0,500	0,574	0,664	0,707	0,766	0,819	0,866
$\cos \varphi$	0,866	0,819	0,750	0,707	0,643	0,574	0,500
$\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)^\circ$	77,9	73,8	67,5	63,6	57,9	51,7	45,0
$\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)$	0,208	0,280	0,382	0,445	0,532	0,621	0,707
$F_1(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi\right)}{\sin \varphi}$	0,416	0,488	0,581	0,629	0,695	0,758	0,817
$\left(\frac{p\pi}{2} \cos \varphi\right)^\circ$	624	590	540	509	463	414	360

$\sin\left(\frac{p\pi}{2}\cos\varphi\right)$	-0,994	-0,965	0,000	0,515	0,974	0,809	0,000
$\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)$	0,978	0,960	0,924	0,896	0,846	0,784	0,707
$F_2(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{p\pi}{2}\cos\varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)}$	-1,010	-0,797	0,000	0,574	1,150	1,030	0,000
$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi)$	-0,423	-0,390	0,000	0,360	0,800	0,780	0,000
$\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$	-0,0529	-0,0487	0,0000	0,0450	0,1000	0,0975	0,000

φ	65°	70°	75°4'	80°	85°	90°
$\sin\varphi$	0,906	0,94	0,968	0,985	0,996	1,000
$\cos\varphi$	0,423	0,342	0,250	0,174	0,087	0,000
$\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)^\circ$	38,1	30,8	22,5	15,7	7,8	0,0
$\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)$	0,788	0,858	0,923	0,963	0,992	1,000
$F_1(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)}{\sin\varphi}$	0,870	0,923	0,953	0,978	0,996	1,000
$\left(\frac{p\pi}{2}\cos\varphi\right)^\circ$	305	246	180	125	63	0,000
$\sin\left(\frac{p\pi}{2}\cos\varphi\right)$	-0,819	-0,914	0,000	0,819	0,884	0,000
$\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)$	0,616	0,512	0,383	0,270	0,136	0,000
$F_2(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{p\pi}{2}\cos\varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\varphi\right)}$	-1,330	-1,780	0,000	3,030	6,500	8,000
$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi)$	-1,150	-1,640	0,000	2,960	6,480	8,000
$\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$	-0,1437	-0,2050	0,000	0,3825	0,8100	1,000

Нормированная диаграмма направленности $\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$ изображена на рис. 52.

8.41. Диаграмма рассчитывается по формуле

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}.$$

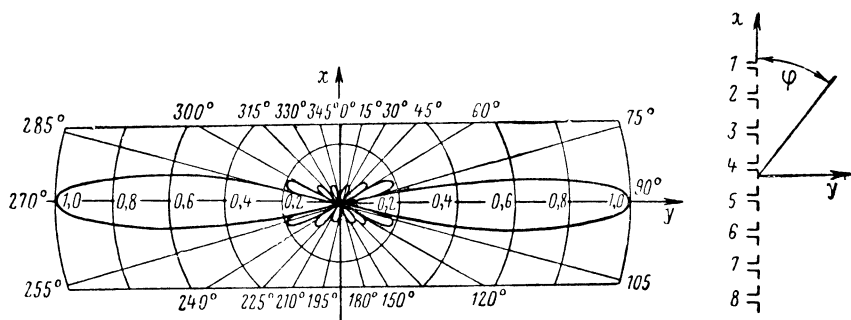


Рис. 52.

Направлениям нулевого излучения соответствуют

$$\cos \theta_0 = \frac{2k}{n} = \frac{k}{2} = \frac{1}{2}; 1,$$

откуда $\theta_0 = 0; 60^\circ$.

Задаваясь различными углами θ , определяем промежуточные значения функции $F(\theta)$ (табл. 17).

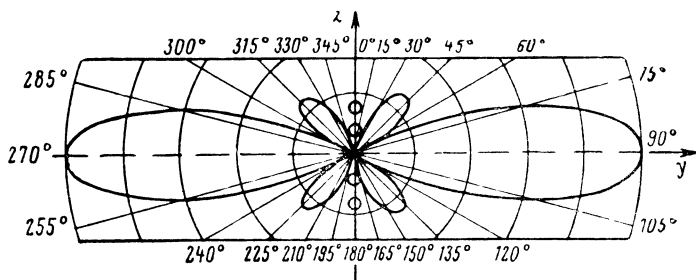


Рис. 53.

Диаграмма направленности, построенная по данным табл. 17, изображена на рис. 53.

8.42. $R_{\Sigma} = 305,7 \text{ ом}$.

θ	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	41°15'
$\cos \theta$	1,000	0,996	0,985	0,966	0,940	0,906	0,866	0,819	0,766	0,752
$\left(\frac{n\pi}{2} \cos \theta\right)^\circ$	360	359	354	348	338	326	312	295	276	270
$\sin \left(\frac{n\pi}{2} \cos \theta\right)$	1,000	-0,017	-0,104	-0,208	-0,375	-0,559	-0,743	-0,906	-0,994	-1 000
$\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)^\circ$	90,0	89,6	88,6	86,9	84,5	81,5	77,9	73,7	68,9	67,6
$\sin \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)$	1,000	1,000	0,999	0,998	0,995	0,989	0,978	0,96	0,933	0,924
$F(\theta)$	0,000	-0,017	-0,104	-0,208	-0,377	-0,565	-0,760	-0,943	-1,060	-1,081
$\frac{F(\theta)}{[F(\theta)]_{\max}}$	0,000	-0,004	-0,026	-0,052	-0,094	-0,141	-0,190	-0,235	-0,265	-0,270

Продолжение

θ	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	75°30'	80°	85°	90°
$\cos \theta$	0,707	0,643	0,574	0,500	0,423	0,342	0,259	0,250	0,174	0,087	0,000
$\left(\frac{n\pi}{2} \cos \theta\right)^\circ$	254	232	206	180	152	123	93	90	62,6	31,4	0,000
$\sin \left(\frac{n\pi}{2} \cos \theta\right)$	-0,961	-0,788	-0,498	0,000	0,469	0,839	0,998	1,000	0,888	0,521	0,000
$\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)^\circ$	63,6	57,8	51,6	45,0	38,0	30,8	23,3	22,5	15,6	7,8	0,0
$\sin \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)$	0,896	0,845	0,784	0,707	0,616	0,512	0,395	0,383	0,269	0,136	0,000
$F(\theta)$	-1,070	-0,932	-0,559	0,000	0,761	1,639	2,522	2,615	3,300	3,833	4,0000
$\frac{F(\theta)}{[F(\theta)]_{\max}}$	-0,267	-0,233	-0,140	0,000	0,190	0,409	0,632	0,658	0,826	0,958	1,000

8.44. Согласно (8.22) излучение провода максимально под углами

$$\begin{aligned}\varphi_{\max} &\approx \arccos \left[1 - \frac{(2k+1)\lambda}{2l} \right] = \arccos \left(1 - \frac{2k+1}{6} \right) = \\ &= \arccos \left(\frac{5}{6}; \frac{1}{2}; \frac{1}{6} \right) = 33^\circ 30'; 60^\circ; 80^\circ 24' .\end{aligned}$$

Излучение отсутствует, как показывает формула (8.21), в направлениях

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= \arccos \left(1 - \frac{k\lambda}{l} \right) = \arccos \left(1 - \frac{k}{3} \right) = \\ &= \arccos \left(1; \frac{2}{3}; \frac{1}{3}; 0 \right) = 0^\circ; 48^\circ 12'; 70^\circ 42'; 90^\circ .\end{aligned}$$

8.45. Максимум основного лепестка диаграммы направленности находится под углом $\varphi_{\max}$ к оси провода, причем

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{\lambda}{2l} = 1 - \frac{1}{10} = 0,9; \quad \varphi_{\max} = 25^\circ 50'; \quad \sin \varphi_{\max} = 0,4355.$$

Искомая амплитуда напряженности электрического поля

$$\begin{aligned}E_m &= \frac{60I_m}{r} \cdot \frac{\sin \varphi_{\max}}{1 - \cos \varphi_{\max}} \sin \left[\frac{\beta l}{2} (1 - \cos \varphi_{\max}) \right] = \\ &= \frac{60 \cdot 0,5 \cdot 0,4355}{30 \cdot 10^3 \cdot 0,1} \sin \left[\frac{360 \cdot 5\lambda}{2\lambda} (1 - 0,9) \right]^\circ = 4,355 \text{ мВ/м} .\end{aligned}$$

8.46. Направления нулевого излучения определяются по формуле

$$\cos \varphi_0 = 1 - \frac{k\lambda}{l} = 1 - \frac{k\lambda}{4\lambda} = 1 - \frac{k}{4} = 1; \frac{3}{4}; \frac{1}{2}; \frac{1}{4}; 0.$$

Отсюда

$$\varphi_0 = 0^\circ, 41^\circ 24', 60^\circ, 75^\circ 30', 90^\circ.$$

Максимальное излучение получается в направлении $\varphi_{\max}$, удовлетворяющем выражению

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{(2k+1)\lambda}{2l} = 1 - \frac{(2k+1)}{8} = \frac{7}{8}, \frac{5}{8}, \frac{3}{8}, \frac{1}{8},$$

откуда

$$\varphi_{\max} = 29^\circ, 51^\circ 19', 68^\circ, 82^\circ 49'.$$

Ниже приводится таблица (табл. 18) расчета требуемой диаграммы направленности, которая изображена на рис. 54 и определяется уравнением

$$F(\varphi) = F_1(\varphi) \cdot F_2(\varphi) = \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} \cos \left[\frac{\beta l}{2} (1 - \cos \varphi) \right].$$

Таблица 18

φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	45°	51°	55°	65°	68°	80°
$\sin \varphi$	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423	0,500	0,574	0,707	0,781	0,819	0,906	0,927	0,985
$\cos \varphi$	0,996	0,985	0,966	0,940	0,906	0,866	0,819	0,707	0,625	0,574	0,423	0,375	0,174
$1 - \cos \varphi$	0,004	0,015	0,034	0,060	0,094	0,134	0,181	0,293	0,375	0,426	0,577	0,625	0,826
$\left[\frac{\beta L}{2} (1 - \cos \varphi) \right]^\circ$	2,9	10,8	24,4	43,2	67,6	96,5	130	211	270	306	416	450	595
$F_1(\varphi)$	21,8	11,6	7,63	5,7	4,5	3,73	3,17	2,41	2,08	1,92	1,57	1,48	1,19
$F_2(\varphi)$	0,050	0,187	0,413	0,684	0,924	0,994	0,766	-0,515	-1,000	-0,809	0,829	1,000	-0,819
$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi)$	1,090	2,170	3,150	3,900	4,160	3,700	2,43	-1,24	-2,08	-1,55	1,30	1,48	-0,975
$\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$	0,26	0,52	0,76	0,94	1,00	0,89	0,58	-0,30	-0,50	-0,37	0,31	0,35	-0,23

φ	83°	85°	95°	97°11'	100°	110°	112°	115°	128°41'	140°	151°	160°	175°
$\sin \varphi$	0,992	0,996	0,996	0,992	0,985	0,940	0,927	0,906	0,781	0,643	0,484	0,342	0,087
$\cos \varphi$	0,125	0,087	-0,087	-0,125	0,174	-0,342	-0,375	-0,423	-0,635	-0,766	-0,875	-0,940	-0,996
$1 - \cos \varphi$	0,875	0,913	1,087	1,125	1,174	1,342	1,375	1,423	1,625	1,766	1,875	1,940	1,996
$\left[\frac{\beta L}{2} (1 - \cos \varphi) \right]^\circ$	630	657	783	810	845	966	990	1025	1170	1270	1350	1397	1437
$F_1(\varphi)$	1,13	1,09	0,917	0,881	0,838	0,700	0,674	0,636	0,480	0,364	0,258	0,176	0,044
$F_2(\varphi)$	-1,000	-0,891	0,891	1,000	0,819	-0,914	-1,000	-0,819	1,000	-0,174	-1,000	-1,682	-0,052
$F(\varphi) = F_1(\varphi) F_2(\varphi)$	-1,130	-0,971	0,816	0,881	0,687	-0,640	-0,674	-0,685	0,480	-0,063	-0,258	-0,120	-0,002
$\frac{F(\varphi)}{[F(\varphi)]_{\max}}$	-0,27	-0,23	0,196	0,210	0,165	-0,154	-0,162	-0,165	0,115	-0,015	-0,062	-0,029	-0,0005

Продолжение

8.47. Направления нулевого излучения площадки соответствуют

$$\sin \varphi'_{a0} = \frac{k\lambda}{a} = \frac{k}{10} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0;$$

$$\varphi'_{a0} = 5^\circ 44'; 11^\circ 33'; 17^\circ 28'; 23^\circ 35'; 30^\circ; 36^\circ 50'; 44^\circ 30';$$

$$53^\circ 05'; 64^\circ; 90^\circ.$$

Максимум излучения получается при

$$\sin \varphi'_{a \max} \approx \frac{(2k+1)\lambda}{2a} = \frac{2k+1}{20} = 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55;$$

$$0,65; 0,75; 0,85; 0,95;$$

$$\varphi'_{a \max} = 8^\circ 38'; 14^\circ 30'; 20^\circ 30'; 26^\circ 50'; 33^\circ 30'; 40^\circ 40'; 48^\circ 40';$$

$$58^\circ 20'; 71^\circ 50'.$$

Промежуточные значения определяются по формуле

$$F(\varphi'_a) = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi'_a} = \frac{\sin(10\pi \sin \varphi'_a)}{10\pi \sin \varphi'_a},$$

где $\varphi'_a = 90^\circ - \varphi_a$.

На рис. 55 показана диаграмма направленности в прямоугольных координатах, построенная по данным табл. 19.

Таблица 19

φ'_a	0°	2°	4°	5°	8°38'	14°30'	20°30'
$\sin \varphi'_a$	0,000	0,052	0,070	0,087	0,151	0,250	0,350
$\left(\frac{a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right) \text{ рад}$	0,00	1,63	2,20	2,73	4,74	7,85	10,98
$\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right)^\circ$	0	93,5	126	156	272	450	629
$\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right)$	0,000	0,998	0,829	0,407	-0,999	1,000	-0,998
$F(\varphi_a)$	1,00	0,612	0,377	0,149	-0,251	-0,127	-0,091

Продолжение

φ'_a	26°50'	33°30'	40°40'	48°40'	58°20'	71°50'
$\sin \varphi'_a$	0,451	0,552	0,652	0,751	0,851	0,951
$\left(\frac{a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right) \text{ рад}$	14,17	17,31	20,4	23,6	26,8	29,8
$\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi'_a\right)^\circ$	812	994	1168	1350	1536	1698

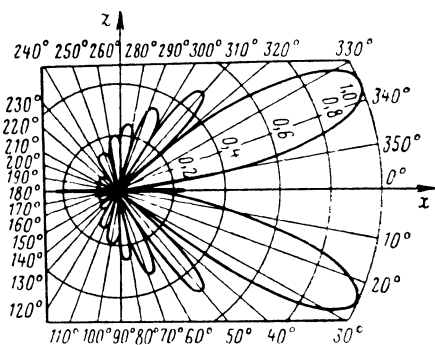


Рис. 54.

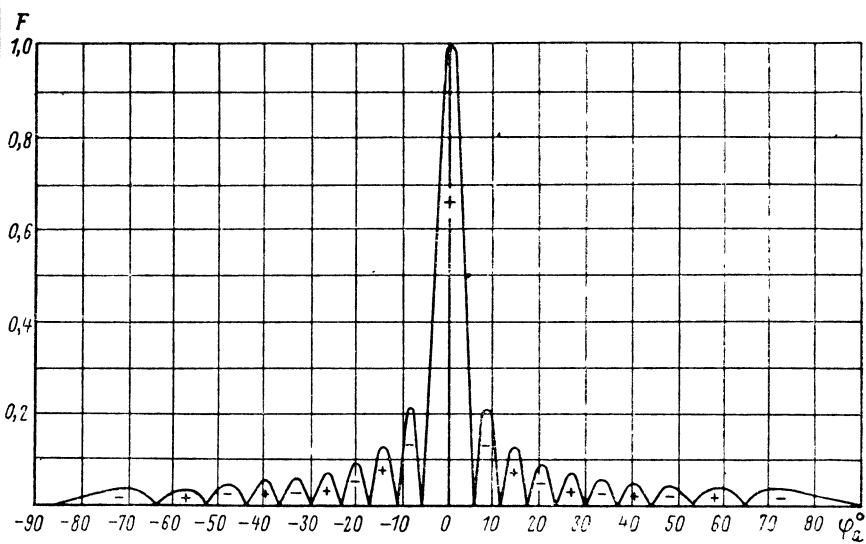


Рис. 55.

$\sin \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi_a' \right)$	0,978	-0,997	0,999	-1,000	0,995	-0,978
$F(\varphi_a)$	-0,069	-0,058	-0,049	-0,042	0,037	-0,033

8. 48. $a \approx 20\lambda$; $b \approx 10\lambda$.

8. 49. $\varphi_{a0} = 78^\circ 30'$; $66^\circ 25'$; $53^\circ 8'$; $36^\circ 50'$; 0° .

$$\varphi_{a \max} = 72^\circ 36'; 60^\circ; 45^\circ 30'; 25^\circ 48'.$$

Углы φ_{a0} и $\varphi_{a \max}$ отсчитываются от плоскости излучающей площадки.

8. 50. $2\varphi' \approx 3^\circ$.

8. 51. $D = 5640$; $S_{\text{эф}} = 4060 \text{ см}^2$.

8. 52. $\mathcal{A}_a = 0,32 \text{ мв}$.

8. 53. $E = 1,56 \text{ мв/м}$.

К ГЛАВЕ IX

9. 2. В четыре раза.

9. 4. $\eta_a = 25\%$.

9. 5. $P_a = 685 \text{ вт}$.

9. 6. $L_{\text{удл}} = 88,1 \text{ мкГн}$.

9. 7. $C_{\text{ук}} = 214,8 \text{ пф}$.

9. 8. $L_{\text{удл}} = 170 \text{ мкГн}$.

9. 9. $R_{\text{п}} = 2,4 \text{ ом}$.

9. 10. $\eta_a = 15\%$.

9. 14. 1. Для определения резонансной длины волны λ_0 задаемся различными значениями λ в м, для которых вычисляем

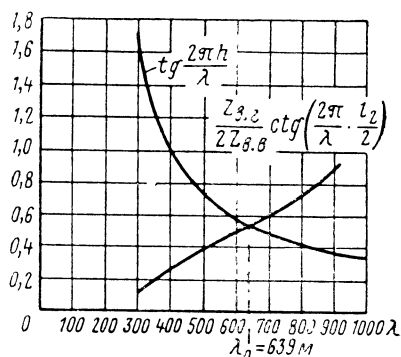


Рис. 56.

$$\frac{2\pi}{\lambda} h = \left(\frac{360 \cdot 50}{\lambda} \right)^\circ; \quad \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l_r}{2} = \left(\frac{180 \cdot 120}{\lambda} \right)^\circ = \left(\frac{21\,600}{\lambda} \right)^\circ;$$

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi h}{\lambda} = \operatorname{tg} \left(\frac{18\,000}{\lambda} \right)^\circ; \quad \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{l_r}{2} \right) = \operatorname{ctg} \left(\frac{21\,600}{\lambda} \right)^\circ;$$

$$\frac{Z_{\text{в.г}}}{2Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{l_r}{2} \right) = \frac{400}{2 \cdot 550} \operatorname{ctg} \left(\frac{21\,600}{\lambda} \right)^\circ = 0,36 \operatorname{ctg} \left(\frac{21\,600}{\lambda} \right)^\circ.$$

2. По данному уравнению рассчитана табл. 20 и построены две кривые (рис. 56), точка пересечения которых определяет резонансную длину волны $\lambda_0 = 639 \text{ м}$. Так как рабочая длина волны λ больше резонансной длины волны антенны, то в данном случае настройка ее производится при помощи удлинительной катушки.

Таблица 20

λ в м	300	400	500	600	640	650	700	800	900	1000
$\left(\frac{18\,000}{\lambda}\right)^\circ$	60	45	36	30	28,12	27,7	25,4	22,5	20	18
$\operatorname{tg}\left(\frac{18\,000}{\lambda}\right)^\circ$	1,732	1	0,726	0,577	0,534	0,525	0,481	0,414	0,364	0,325
$\left(\frac{21\,600}{\lambda}\right)^\circ$	72	54	43,2	36	33,75	33,23	30,8	27	24	21,4
$\operatorname{ctg}\left(\frac{21\,600}{\lambda}\right)^\circ$	0,325	0,726	1,065	1,376	1,436	1,527	1,675	1,336	2,246	2,552
$\frac{Z_{\text{в.г}}}{2Z_{\text{в.в}}}\operatorname{ctg}\left(\frac{21\,600}{\lambda}\right)^\circ$	0,117	0,261	0,383	0,496	0,538	0,549	0,601	0,707	0,809	0,919

3. Размер l'_r эквивалентного вертикального вибратора определяем по формуле

$$\operatorname{ctg} \frac{2\pi l'_r}{\lambda_0} = \frac{Z_{\text{в.г}}}{2Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{l_r}{2} \right) = 0,36 \operatorname{ctg} \left(\frac{21\,600}{639} \right)^\circ = 0,538.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} l'_r = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} 0,538 = (61,74)^\circ,$$

а

$$l'_r = \frac{61,74 \cdot 639}{360} = 109,6 \text{ м.}$$

4. Теперь найдем полную длину эквивалентного вертикального вибратора

$$l_{0e} = h + l'_r = 50 + 109,6 = 159,6 \text{ м,}$$

индуктивность удлинительной катушки

$$L_{\text{удл}} = \frac{\lambda}{1880} Z_{\text{в.в}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} l_{0e} \right) = \frac{900 \cdot 550}{1880} \operatorname{ctg} \left(\frac{360 \cdot 159,6}{900} \right)^\circ = 541 \text{ мкГн.}$$

9.15. 1. Статическую емкость горизонтальной части антенны определяем по формуле (9.11), в которой линейные размеры и емкость выражены в см:

$$C_{\text{а.г}} = \frac{\pi l_r}{2 \ln \left[\frac{2h}{r} \left(\frac{2h}{a} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right]}.$$

Знаменатель этого выражения равен

$$2 \ln \left[\frac{2 \cdot 60 \cdot 10^2}{0,3} \left(\frac{2 \cdot 60 \cdot 10^2}{80} \right)^3 \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \right] = 6,18.$$

Следовательно,

$$C_{a.r} \frac{4 \cdot 90 \cdot 10^2}{6,18} = 5825 \text{ см.}$$

Статическую емкость снижения определяем по формуле (9.12), в которой емкость и линейные размеры выражены в см:

$$C_{a.b} = \frac{h \cdot n}{2 \ln \left[\frac{h}{\sqrt[3]{3}r} \left(\frac{h}{\sqrt[3]{3}a} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right]}.$$

Знаменатель этого выражения равен

$$2 \ln \left[\frac{h}{\sqrt[3]{3}r} \left(\frac{h}{\sqrt[3]{3}a} \right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \right] = 2 \ln \left[\frac{60 \cdot 10^2}{1,73 \cdot 0,3} \left(\frac{60 \cdot 10^2}{1,73 \cdot 80} \right)^3 \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \right] = 8,84.$$

Следовательно,

$$C_{a.b} \frac{60 \cdot 10^2 \cdot 4}{8,84} = 2715 \text{ см.}$$

Общая статическая емкость антенны

$$C_a = C_{a.r} + C_{a.b} = 5825 + 2715 = 8540 \text{ см.}$$

2. Волновое сопротивление данной антенны можно определить по ее погонным параметрам L_1 , C_1 , считая, что скорость распространения электромагнитных волн

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек, где } L_1 \text{ в } \text{гн/м, а } C_1 \text{ в } \text{ф/м.}$$

Отсюда находим, что

$$L_1 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16} C_1},$$

но так как $1 \text{ ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$, а $1 \text{ м} = 10^2 \text{ см}$, то волновое сопротивление

$$Z_a = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{9 \cdot 10^{11}}{3 \cdot 10^8 C_1 \cdot 10^2} = \frac{30}{C_1}.$$

Погонная емкость горизонтальной и вертикальной частей антенны соответственно равна

$$C_{1r} = \frac{C_{a.r}}{l_r} = \frac{5825}{90 \cdot 10^2} = 0,647 \text{ см/см;}$$

$$C_{1b} = \frac{C_{a.b}}{h} = \frac{2715}{60 \cdot 10^2} = 0,353 \text{ см/см,}$$

а волновые сопротивления горизонтальной и вертикальной частей антенны соответственно равны

$$Z_{a.r} = \frac{30}{C_{1r}} = \frac{30}{0,647} = 46,4 \text{ ом;}$$

$$Z_{a.b} = \frac{30}{C_{1b}} = \frac{30}{0,353} = 85 \text{ ом.}$$

9. 16. $C_a = 6524$ см; $Z_{в.г} = 301,2$ ом; $Z_{в.в} = 209,7$ ом.

9. 17. Определяем коэффициент фазы

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{360^\circ}{720} = 0,5 \text{ град/м.}$$

Размер l'_r эквивалентного вертикального вибратора определяем по формуле

$$\text{ctg } \beta l'_r = \frac{Z_{в.г}}{Z_{в.в}} \text{ctg } \beta l_r = \frac{450}{550} \text{ctg } (0,5 \cdot 80)^\circ = 0,976,$$

откуда

$$\beta l'_r = \text{arc ctg } 0,976 = 44,8^\circ,$$

а

$$l'_r = \frac{44,8}{\beta} = \frac{44,8}{0,5} = 89,6 \text{ м.}$$

Отсюда полная длина эквивалентного вертикального вибратора

$$l_{0e} = h + l'_r = 60 + 89,6 = 149,6 \text{ м.}$$

Амплитуда напряжения у основания (в точке А) антенны

$$U_{mA} = Z_{в.в} I_{m0} \text{ctg } \beta l_{0e} = 550 \cdot 10 \cdot \text{ctg } (0,5 \cdot 149,6)^\circ = 1495 \text{ в.}$$

Амплитуда напряжения и тока в точке В соединения горизонтального и вертикального проводов

$$U_{mB} = Z_{в.в} \frac{I_{m0} \cos \beta l'_r}{\sin \beta l_{0e}} = \frac{550 \cdot 10 \cos (0,5 \cdot 89,6)^\circ}{\sin (0,5 \cdot 149,6)^\circ} = 4040 \text{ в.}$$

$$I_{mB} = \frac{I_{m0} \sin \beta l'_r}{\sin \beta l_{0e}} = \frac{10 \sin (44,8)^\circ}{\sin (74,8)^\circ} = \frac{10 \cdot 0,705}{0,965} = 7,3 \text{ а.}$$

Амплитуда напряжения в пучности (в точке С)

$$U_{mC} = \frac{Z_{в.в} I_{m0} \cos \beta l'_r}{\cos \beta l_r \sin \beta l_{0e}} = \frac{550 \cdot 10 \cos (44,8)^\circ}{\cos 40^\circ \sin 74,8^\circ} = 7430 \text{ в.}$$

9. 18. На входных клеммах антенны $U_{mA} = 946,8$ в; $I_{mA} = 5$ а; в точке соединения вертикального и горизонтального проводов $U_{mB} = 1831,5$ в; $I_{mB} = 4,07$ а; на концах горизонтального провода $U_{mC} = 2004$ в; $I_{mC} = 0$.

9. 19. Амплитуда напряжения в режиме несущей частоты в $(1+m)$ раз меньше, чем в режиме максимальной мощности, а последняя в пучности ($U_{mC \max}$) не должна превышать критического значения $U_{m \text{кр}}$. Следовательно, эффективное значение напряжения в пучности в режиме несущей частоты должно быть не более

$$U_{e \text{ н}} = \frac{U_{mC \text{ н}}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{mC \max}}{\sqrt{2}(1+m)} \leq \frac{U_{m \text{кр}}}{\sqrt{2}(1+m)} = \frac{100}{1,41 \cdot 2} = 35,5 \text{ кВ.}$$

Поскольку напряжения и токи во всех точках антенны изменяются в прямой пропорции, то максимально допустимое действующее значение напряжения на клеммах антенны

$$(U_{eA})_{\text{доп}} = (U_{eC \text{ н}}) \frac{U_{mA}}{U_{mC}} = 35,5 \frac{946,8}{2004} = 16,8 \text{ кВ},$$

а допустимое действующее значение тока у основания антенны

$$(I_{eA})_{\text{доп}} = I_{mA} \frac{U_{eC \text{ н}}}{U_{mC}} = 5 \frac{35,5}{2} = 88,8 \text{ А}.$$

9. 21. Определяем действующую высоту антенны по формуле

$$\begin{aligned} h_d &= \frac{2 \sin \left[\beta \left(l_{0e} - \frac{h}{2} \right) \right] \sin \frac{\beta h}{2}}{\beta \sin \beta l_{0e}} = \\ &= \frac{2 \sin [0,4 (177,5 - 25)]^\circ \sin (0,4 \cdot 25)^\circ}{\frac{2\pi}{900} \sin (0,4 \cdot 177,5)^\circ} = \\ &= \frac{2 \sin 61^\circ \sin 10^\circ}{0,697 \cdot 10^{-2} \sin 71^\circ} = 46,4 \text{ м}. \end{aligned}$$

Находим сопротивление излучения

$$R_{\Sigma} = 1600 \left(\frac{h_d}{\lambda} \right)^2 = 1600 \left(\frac{46,4}{800} \right)^2 = 4,3 \text{ Ом}.$$

Сопротивление потерь в антенне

$$R_{\Pi} = A \frac{\lambda}{\lambda_0} = 3 \cdot \frac{900}{639} = 4,2 \text{ Ом}.$$

К. п. д. антенны

$$\eta_a = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{\Pi}} = \frac{4,3}{4,3 + 4,2} \cdot 100 = 50,6 \%.$$

9. 22. $h_d = 0,19 \text{ м}$; $R_{\Sigma} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$.

9. 23. $\mathcal{E}_{ma} = 0,72 \text{ мкВ}$.

9. 24. $\mathcal{E}_{ma} = 0,62 \text{ мкВ}$.

9. 25. $R_{\Sigma} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$; $\mathcal{E}_{ma} = 0,17 \text{ мВ}$.

К ГЛАВЕ X

10. 4. Вибратор ВГ при длине l может работать в диапазоне волн $0,8l < \lambda < 4l$, но так как в данном случае требуется меньший коэффициент перекрытия диапазона $\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{50}{20} = 2,5$, то можно улучшить согласование вибратора с фидером, установив

$$l = \frac{\lambda_{\min}}{1,5} = \frac{\lambda_{\max}}{3,75} = 13,3 \text{ м}.$$

10. 5. Вибратор может работать в диапазоне волн

$$\lambda_{\min}=0,8l=0,8 \cdot 15=12 \text{ м}, \lambda_{\max}=4l=4 \cdot 15=60 \text{ м}.$$

Более эффективно вибратор работает на волнах

$$\lambda=(1,5 \div 3,5)l=22,5 \div 52,5 \text{ м}.$$

10. 6. Угол наклона луча определяется выражением (10. 2).

$$\sin \delta_{\max}=\frac{\lambda}{4h}=0,5,$$

откуда $\delta_{\max}=30^\circ$.

Дальность связи согласно выражению (10. 3)

$$R=\frac{8Hh\sqrt{1-\frac{\lambda^2}{16h^2}}}{\lambda}=\frac{8 \cdot 300\sqrt{1-\frac{1}{4}}}{2}=1020 \text{ км}.$$

10. 7. $h=17,4 \text{ м}$.

10. 8. $x=0,06\lambda=1,8 \text{ м}$.

10. 9. $x=1,37 \text{ м}$.

10.10. Подставим $Z_{в.а}=300 \text{ ом}$ в формулу Кессениха (8. 15)

$$300=120\left(\ln \frac{\lambda}{\pi r}-0,577\right)=276 \lg \frac{\lambda}{\pi r}-69,24;$$

$$\lg \frac{\lambda}{\pi r}=\frac{369,24}{276}=1,337; \quad \frac{\lambda}{\pi r}=21,7; \quad \frac{r}{\lambda}=\frac{1}{3,14 \cdot 21,7}=0,015.$$

Значит, диаметр вибратора должен составлять примерно 0,03 от длины волны. Например, при длине волны $\lambda=60 \text{ м}$ диаметр вибратора должен быть порядка 1,8 м. Такие толстые вибраторы используются для работы в широком диапазоне волн. В частности, в диполе Надененко они изготавливаются не сплошными, а в виде параллельных проводов, расположенных по образующим цилиндра большого диаметра.

10. 11. Обозначение диполя ВГД $\frac{20}{15} 2$ указывает на то, что диаметр цилиндра $2r=2 \text{ м}$, а длина его l равна $2 \times 20=40 \text{ м}$. Пользуясь формулой (10. 6), находим эквивалентный радиус диполя

$$r_{\bullet}=r\sqrt[n]{\frac{nr'}{r}}=1\sqrt[8]{\frac{8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{1}}=0,58 \text{ м},$$

где n — число проводов в цилиндре, принято равным восьми.

По формуле (10. 7) определяем волновое сопротивление диполя

$$Z_{в.а}=120\left(\ln \frac{l}{2r_{\bullet}}-1\right)=120\left(2,3 \lg \frac{20}{0,58}-1\right)=304,3 \text{ ом}.$$

10. 12. $Z_{в.а}=287 \text{ ом}$.

10. 13. Для антенны $СГ \frac{\pi}{p} P$ — среднее значение сопротивления

излучения одного вибратора $R_{\Sigma 1}$ в np раз меньше сопротивления излучения всей антенны $R_{\Sigma a}$. Согласно ГОСТ 6255—52 антенна $СГ \frac{2}{4} P$ имеет $R_{\Sigma a} = 1117 \text{ ом}$ (см. приложение V). Следовательно,

$$R_{\Sigma 1} = \frac{R_{\Sigma a}}{np} = \frac{1117}{8} = 139 \text{ ом}.$$

Поскольку питание антенн $СГ$ производится в пучности напряжения вибратора, то можно рассматривать эту антенну как совокупность волновых вибраторов, каждый из которых образован двумя полуволновыми вибраторами одного этажа с общей линией питания. Одиночный волновой вибратор имеет $R_{\Sigma \pi} = 200 \text{ ом}$, т. е. меньше, чем приходится на один волновой вибратор данной антенны ($2R_{\Sigma 1} = 2 \cdot 139 = 278 \text{ ом}$). Причина этого — внесение сопротивления в каждый вибратор рефлектором, другими вибраторами собственно антенны и землей.

10. 14. $R_{вх} = 895 \text{ ом}$ для $СГ \frac{2}{4} P$; $R_{вх} = 435 \text{ ом}$ для $СГ \frac{2}{8} P$.

10. 15. На уровне верхнего (I) этажа входное сопротивление волнового вибратора, подключенного к линии питания одной секции 9, равно

$$R_{вх I} = \frac{Z_{в.а}^2}{R_{\Sigma \pi}} = \frac{1000^2 \left(\frac{np}{2} \right)}{R_{\Sigma a}} = \frac{10^6 \cdot 16}{4359} = 3680 \text{ ом},$$

где $R_{\Sigma \pi} = \frac{R_{\Sigma a}}{\frac{np}{2}}$ — сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока одного волнового вибратора.

Ниже этажом (II) входное сопротивление

$$R_{вх II} = \frac{R_{вх I}}{2} = 1840 \text{ ом}.$$

Еще ниже этажом (III) входное сопротивление

$$R_{вх III} = \frac{R_{вх I}}{3} = 1227 \text{ ом}.$$

На нижнем (IV) этаже антенны входное сопротивление

$$R_{вх IV} = \frac{R_{вх I}}{4} = 920 \text{ ом}.$$

К точкам 1—2 подключаются в параллель две секции, а потому входное сопротивление на них

$$R_{1-2} = \frac{R_{вх IV}}{2} = 460 \text{ ом}.$$

К точкам 5—6 подключаются в параллель два равных сопротивления $R_{вх\ 1-2}$ и $R_{вх\ 3-4}$ и, следовательно,

$$R_{вх5-6} = \frac{R_{вх1-2}}{2} = 280\ \text{ом}.$$

Теперь определяем коэффициенты стоячих волн на участках фидеров между I и II этажами, II и III этажами и т. д.

$$k_{с.в\ I-II} = \frac{R_{вх\ I}}{Z_{в.ф}} = \frac{3680}{600} = 6,1; \quad k_{с.в\ II-III} = \frac{R_{вх\ II}}{Z_{в.ф}} = \frac{1840}{600} = 3,1;$$

$$k_{с.в\ III-IV} = \frac{R_{вх\ III}}{Z_{в.ф}} = \frac{1227}{600} = 2,1; \quad k_{с.в\ IV-(1-2)} = \frac{R_{вх\ IV}}{Z_{в.ф}} = \frac{920}{600} = 1,5;$$

$$k_{с.в\ (1-2)-(5-6)} = \frac{Z_{в.ф}}{R_{вх\ 1-2}} = \frac{600}{460} = 1,3; \quad k_{с.в\ (7-8)-(5-6)} = \frac{Z_{в.ф}}{R_{вх\ (5-6)}} = \frac{600}{280} = 2,1.$$

10. 16. Коэффициент стоячей волны в фидере, начиная от верхнего этажа и кончая главным фидером, принимает значения 6; 3; 1,5; 1,6.

10. 17. Определяем среднюю мощность, излучаемую одним вибратором,

$$P_{\Sigma 1} = \frac{P_{\Sigma a}}{m \cdot n} = \frac{10}{8} = 1,25\ \text{квт}.$$

Среднее значение сопротивления излучения одного вибратора

$$R_{\Sigma 1} = \frac{R_{\Sigma a}}{mn} = \frac{1117}{8} = 139\ \text{ом}.$$

Амплитуда тока вибратора в пучности

$$I_{m\ II} = \sqrt{\frac{2P_{\Sigma 1}}{R_{\Sigma 1}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,25 \cdot 10^3}{139}} = \sqrt{18,7} = 4,3\ \text{а}.$$

Амплитуда напряжения в пучности

$$U_{m\ II} = I_{m\ II} Z_{в.а} = 4,3 \cdot 10^3 = 4300\ \text{в} = 4,3\ \text{кв}.$$

10. 18. $P_{\Sigma a} = 8,7\ \text{квт}.$

10. 24. Максимум излучения провода, обтекаемого бегущей волной тока, направлен под углом, косинус которого

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{\lambda}{2l}.$$

Острый угол ромба равен $2\varphi_{\max}$, а тупой угол $2\gamma = 180^\circ - 2\varphi_{\max}$.

Результаты расчета по этим формулам приведены в табл. 21.

Таблица 21

Длина провода	2λ	3λ	4λ	5λ	6λ	8λ	10λ
$\varphi_{\max}^\circ$	41,4	33,5	28,9	25,8	23,6	20,6	18,2
Острый угол $2\varphi_{\max}^\circ$	82,8	67	57,8	51,6	47,2	41,2	36,4
Тупой угол ромба $2\gamma = 180 - 2\varphi_{\max}$ в град	97,2	113	122,2	128,4	132,8	138,8	143,6

Как видно из расчета, при $l > 4\lambda$ с изменением длины волны требуется весьма незначительное изменение углов ромба, чтобы сохранить неизменным направление максимального излучения и приёма, которое совпадает с главной диагональю ромба. В этом одна из причин хороших диапазоновых свойств ромбической антенны. Заметим, что если учесть затухание волн в проводе, то углы $\varphi_{\max}$ окажутся несколько меньше, а углы γ — соответственно больше.

10. 25. $h \approx \lambda_0$.

10. 26. $h = 0,5\lambda_0$.

10. 27. Сначала определяем высоту антенны. Так как при связи более чем на 1500 км оптимальный угол наклона луча к земной поверхности равен $\delta_{\text{опт}} = 15^\circ$, то $h = \lambda_0$ (см. задачу 10. 25).

Затем находим длину провода ромба l . Чем больше эта длина, тем меньше сказывается изменение длины волны на направлении максимального излучения антенны и тем уже главный лепесток диаграммы направленности. Вместе с тем уменьшается угол наклона луча в вертикальной плоскости, поскольку каждый провод ромба служит осью, относительно которой ориентируется диаграмма направленности всей антенны. Поэтому имеется определенная зависимость между наиболее выгодными значениями угла наклона луча в вертикальной плоскости $\delta_{\text{опт}}$ и половиной тупого угла ромба γ , а именно

$$\gamma = 90^\circ - \delta_{\text{опт}} = 90 - 15 = 75^\circ.$$

Этому углу согласно табл. 21 соответствует длина $l > 10\lambda_0$. Если учесть затухание в проводе, то углу $\gamma = 75^\circ$ соответствует длина провода $l = 7,5\lambda_0$, но при такой величине l антенна окажется чрезмерно громоздкой. Поэтому предпочитают устанавливать длину $l = 4\lambda_0$, которой соответствует угол $\gamma = 65^\circ$. Итак, в данном случае целесообразно использовать антенну РГ $\frac{65}{4}1$ ($\gamma = 65^\circ$, $l = 4\lambda_0$, $h = \lambda_0$).

10. 28. Мощность, подводимая к антенне,

$$P_a = \frac{P_{\Sigma}}{\eta_a} = \frac{40}{0,65} = 53,4 \text{ кват.}$$

Мощность, рассеиваемая на поглощающем сопротивлении (потерями на нагрев проводов ромба пренебрегаем), будет

$$P_R = P_a - P_z = 53,4 - 40 = 13,4 \text{ кВт.}$$

Поглощающее сопротивление конструктивно выполняется в виде двухпроводной стальной линии большой длины l_R с волновым сопротивлением $Z_{в.л} = 600 \text{ ом}$. При распространении бегущей волны от одного конца линии к другому мощность волны уменьшается от P_R до $P_R e^{-2\alpha l_R}$ и при движении в обратном направлении от $P_R e^{-2\alpha l_R}$ до $P_R e^{-4\alpha l_R}$. Поскольку в линии поглощается 99% поступающей мощности, то к ромбу возвратится $13,4 \times 0,01 = 0,13 \text{ кВт}$,

$$\text{а } \frac{P_R e^{-4\alpha l_R}}{P_R} = 0,01; \quad 4\alpha l_R = \ln 100 = 2,3 \lg 100 = 4,6.$$

Отсюда получаем формулу для расчета длины линии

$$l_R = \frac{4,6}{4\alpha} = \frac{1,15}{\beta}.$$

Затухание линии равно $\alpha = \frac{R_1}{2Z_{в.л}}$, где R_1 — погонное сопротивление линии. Поскольку линия изготовлена из стали, то пользуемся формулой

$$R_1 = \frac{31,1}{r\sqrt{\lambda}}, \text{ где } r \text{ в мм, } \lambda \text{ в м.}$$

В данном случае применяем провода радиусом $r = 1,5 \text{ мм}$ и получаем, что затухание

$$\alpha = \frac{R_1}{2Z_{в.л}} = \frac{31}{1,5\sqrt{60} \cdot 2 \cdot 600} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ nep/м,}$$

а длина поглощающей линии равна

$$l_R = \frac{1,15}{\alpha} = \frac{1,15}{2,24 \cdot 10^{-3}} = 514 \text{ м.}$$

10. 29. $P_R = 14 \text{ кВт}$.

10. 30. Коэффициент замедления волны, при котором получается максимальный коэффициент усиления антенны, определяется по формуле.

$$k = 1 + \frac{\lambda}{2l_a} = 1 + \frac{14}{2 \cdot 91,2} = 1,08.$$

Подставляем в эту формулу $l_a = 91,2 \text{ м}$ и $\lambda = \lambda_{\min} = 14 \text{ м}$ (наибольшее замедление получается при минимальной длине волны).

Этому соответствует фазовая скорость в линии

$$v_\phi = \frac{c}{k} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,08} = 2,778 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

10.31. $v_\phi = 2,667 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$

10. 32. Погонная емкость собирательной линии антенны (без вибраторов) определяется исходя из того, что волновое сопротивление этой линии $Z_{в.л}=600 \text{ ом}$, а скорость распространения волн в ней $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$:

$$Z_{в.л} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \quad c = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

откуда

$$C_1 = \frac{1}{c Z_{в.л}} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 600} = 5,111 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м.}$$

За счет конденсаторов связи, емкость которых согласно наименованию антенны равна $C_k=4 \text{ см}=4,4 \text{ пф}$, погонная емкость собирательной линии увеличивается. Поскольку через участок линии, равный $l=2,4 \text{ м}$, эти конденсаторы соединяются попарно последовательно, то дополнительная погонная емкость равна

$$\frac{C_k}{2l} = \frac{4,4 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 2,4} = 0,9188 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м.}$$

Если пренебречь шунтирующим действием вибраторов, то фазовая скорость в линии выразится формулой

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_1 \left(C_1 + \frac{C_k}{2l} \right)}},$$

а коэффициент замедления волн в линии равен

$$\begin{aligned} k &= \frac{c}{v_\phi} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \cdot \frac{\sqrt{L_1 \left(C_1 + \frac{C_k}{2l} \right)}}{1} = \\ &= \sqrt{\frac{C_1 + \frac{C_k}{2l}}{C_1}} = \sqrt{\frac{5,1111 + 0,9188}{5,1111}} = 1,098. \end{aligned}$$

Фазовая скорость волн в линии антенны

$$v_\phi = \frac{c}{k} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,098} = 2,7322 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

10. 33. $k=1,188$; $v_\phi=2,525 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$

К ГЛАВЕ XI

11. 1. Не будут, так как входное сопротивление этих перемычек при идеальной проводимости внутренних стенок волновода равно бесконечности.

11. 2. Не будут по той же причине, что и в задаче 11. 1: перемычка длиной x имеет входное сопротивление

$$Z'_{\text{вх}} = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \beta x = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right),$$

другая перемычка длиной $\frac{\lambda}{2} - x'$ имеет

$$Z''_{\text{вх}} = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{2} - x \right) \right] = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\pi - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) = -jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} x$$

и поскольку они включены параллельно, то их общее сопротивление

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z'_{\text{вх}} Z''_{\text{вх}}}{Z'_{\text{вх}} + Z''_{\text{вх}}} = \frac{jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \left[-jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right]}{jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) - jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right)} = \infty.$$

11. 3. Напряжение между стенками в продольном направлении, и продольный ток изменяются по закону бегущих волн, а в поперечных сечениях напряжение между стенками волновода и поперечный ток проводимости распределяются по закону стоячих волн.

11. 8. Ток проводимости на уровне GK равен сумме токов смещения между OO' и GK , ток проводимости на уровне HN равен сумме токов смещения между OO' и HN , соответственно на уровне LM суммируются все токи смещения от OO' до LM , а на уровне PR — от OO' до PR .

11. 9. В сечениях 4, 5 продольный ток проводимости равен сумме токов смещения от сечения 3 соответственно до сечений 4, 5, а в сечении 6 суммируются токи смещения от 7 до 6.

11. 21. $\lambda_{\text{кр}} = 2a$ — для H_{10} ; $\lambda_{\text{кр}} = a$ для H_{20} ;

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ — для } H_{11} \text{ и } E_{11};$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + 2b^2}} \text{ — для } H_{21}.$$

11. 22, 11. 23. Результаты сведены в табл. 22.

11. 25. Результаты расчета сведены в табл. 23.

Таблица 22

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

Таблица 23

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

11. 28. $\lambda_{кр}=45,7$ мм; $v_{\phi}=4,123 \cdot 10^8$ м/сек; $v_{гр}=2,183 \cdot 10^8$ м/сек; $\lambda_{в}=4,12$ см.

11. 29. $\lambda_{гр}=11,4$ мм; $v_{\phi}=3,988 \cdot 10^8$ м/сек; $v_{гр}=2,256 \cdot 10^8$ м/сек; $\lambda_{в}=1$ см.

11. 30. $Z_{в}=493,1$ ом; $Z'_{в}=387,1$ ом.

11. 31. $f=50$ Гц; $Z=379,2$ ом.

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

$$Z_{в.с} = \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}},$$

где

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

$$Z_{в1} = \frac{\pi b_1}{2a_1} \cdot \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}};$$

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

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

$$Z_{в.с} = \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}} \text{ соотношение } b_c = \sqrt{b_1 b_2} = \sqrt{9,53 \cdot 7,08} = 8,27 \text{ мм.}$$

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

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

Следовательно, длина согласующего отрезка волновода равна

$$l_c = \frac{\lambda_{в}}{4} = 8,65 \text{ мм.}$$

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

11. 34. Критическая длина волны

$$\lambda_{кр} = 1,31D = 1,31 \cdot 25,4 = 33,3 \text{ мм.}$$

Длина волны в волноводе

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

Волновое сопротивление волновода

$$Z_{\text{в}} = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{377}{0,436} = 864,6 \text{ ом.}$$

Коэффициент затухания в волноводе при волне E_{01}

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\gamma}}}{60\pi D \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{5,8 \cdot 10^7}}}{60\pi D \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \\ &= \frac{0,00446 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2}{D \sqrt{1 - 0,372 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2}} = \\ &= \frac{0,00446 \left(\frac{3}{2,54}\right)^2}{2,54 \sqrt{3} \sqrt{1 - 0,372 \left(\frac{3}{2,54}\right)^2}} = 0,002 \text{ nep/м} = 0,017 \text{ db/м.} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P_{\text{пред}} &= \frac{6,63 \cdot 10^{-4} E_{\text{проб}}^2 ab}{k_{\text{с.в}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2} = \\ &= \frac{6,63 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 19,05 \cdot 9,525 \cdot 10^{-6}}{2,04} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{25}{2 \cdot 19,05}\right)^2} = \\ &= 400 \text{ квт,} \end{aligned}$$

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 ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$, $\gamma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ 1/ом} \cdot \text{м}$)

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

$$= 6,91 \cdot 10^{-10} \sqrt{12 \cdot 10^9} \frac{1 + \frac{2 \cdot 9,525}{19,05} \left(\frac{25}{2 \cdot 19,05} \right)^2}{9,525 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - \left(\frac{25}{2 \cdot 19,05} \right)^2}} =$$

$$= 1,511 \cdot 10^{-2} \text{ неп/м} = 0,131 \text{ дб/м}.$$

В соответствии со значениями γ латунных, алюминиевых и покрытых себемром волноводов нужно ввести в эту формулу коэффициенты соответственно 1,92; 1,25; 0,97, т. е. в данном случае получаем

$$\alpha = 0,252; 0,164; 0,127 \text{ дб/м}.$$

11.36. $P_{\text{пред}} = 1,08 \text{ Мвт}$; $P_{\text{доп}} = 5,39 \text{ квт}$.

11.37. $\alpha = 0,16 \text{ дб/м}$.

11.38. $\lambda_{\text{кр}} = 4 \text{ см}$.

11.39. Предельная мощность в волноводе

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

$$= \frac{6,63 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 23 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2}}{1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4,1}{4,6} \right)^2} = 0,62 \cdot 10^6 \text{ вт}.$$

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. 2 в данном случае (при $h = 12 \text{ км}$) 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

$$\alpha = 6,91 \cdot 10^{-10} \sqrt{f} \frac{1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}{b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}} = 6,91 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{3 \cdot 10^8}{4,1 \cdot 10^{-2}}} \times$$

$$\times \frac{1 + \frac{2 \cdot 1}{2,3} \left(\frac{4,1}{2 \cdot 2,3} \right)^2}{10^{-2} \sqrt{1 - \left(\frac{4,1}{2 \cdot 2,3} \right)^2}} = 0,022 \text{ неп/м} = 0,19 \text{ дб/м}.$$

11.40. 1. Находим на круговой диаграмме (рис. 57) точку, характеризующую входную проводимость волновода в месте расположения минимума напряженности электрического поля. Так как

в данном случае $k_{с.в}=2,4$, то в месте расположения минимума электрического поля входное сопротивление волновода

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

или

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

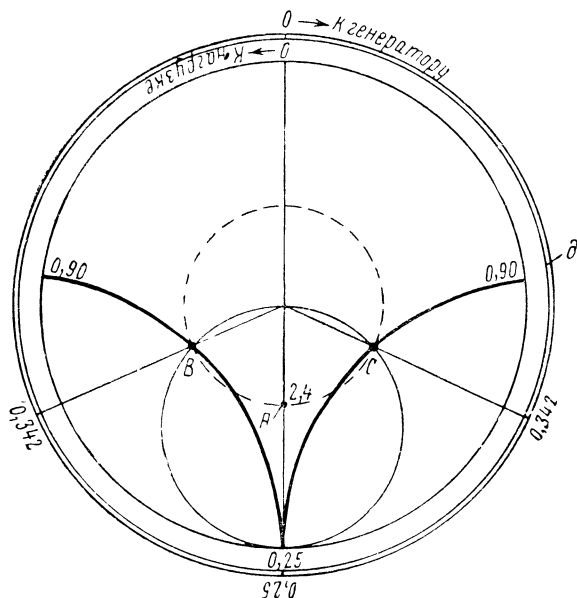


Рис. 57.

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

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

Наличие двух точек пересечения В и С указывает на возможность согласования волновода при помощи индуктивной (точка С) и емкостной (точка В) диафрагм. Прямые, проведенные через центр диаграммы и точки В, С, пересекают шкалу d в положении $0,342 \lambda_B$, причем точке В соответствует шкала отсчета к генератору, а точка С — к нагрузке.

Следовательно, индуктивная диафрагма должна быть включена на расстоянии $(0,342-0,25) \lambda_B=0,092 \cdot 3,97=0,365$ 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 емкостного характера. Емкостная диафрагма должна быть расположена на равном расстоянии в направлении 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 $\frac{\lambda}{a} = \frac{3}{2,29} = 1,31$.

На основании этих данных устанавливаем по графикам (рис. 58, $a, б$), что в случае применения симметричной емкостной диафрагмы $b'/a = 0,195$, откуда $b' = 0,195 a = 0,195 \cdot 2,29 = 0,45$ см и глубина погружения $\frac{b-b'}{2} = \frac{1,02-0,45}{2} = 0,28$ см.

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

11.41. Симметричная индуктивная диафрагма должна быть расположена на расстоянии $0,074 \cdot 44,5 = 3,9$ мм от сечения с минимумом поперечной составляющей напряженности электрического поля в направлении к нагрузке. Глубина погружения диафрагмы 5,05 мм (рис. 58, $в, г$).

11.42. 1. Длина волны в волноводе

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

2. Волновое сопротивление волновода

$$Z_{\text{в}} = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,2}{4,6}\right)^2}} = 524 \text{ ом.}$$

3. Сначала определяем действующую высоту вибратора, предполагая, что последний находится в середине широкой стенки волновода ($y_0 = a/2$) и на расстоянии $l_2 = \lambda_{\text{в}}/4$ от закорачивающего поршня. По условию согласования коаксиальной линии с волноводом (11.11)

$$\frac{2h^2}{ab} Z_{\text{в}} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} y_0 \right) \sin^2 (\beta_{\text{в}} l_2) = Z_{\text{в.ф}},$$

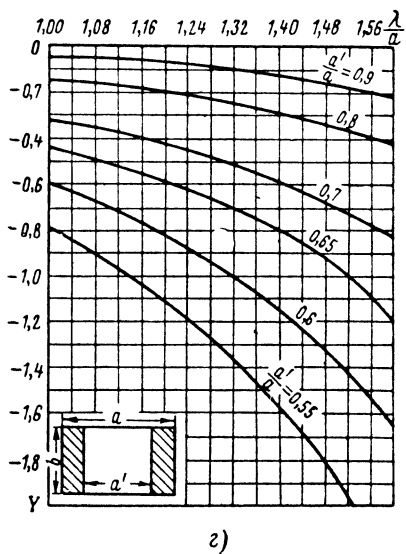
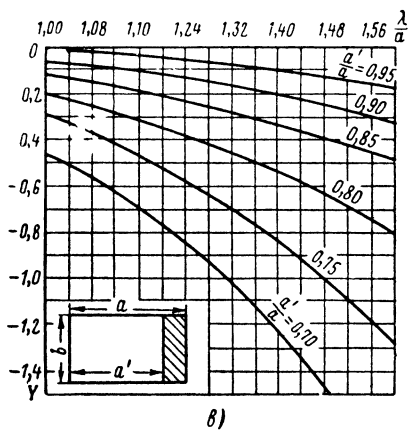
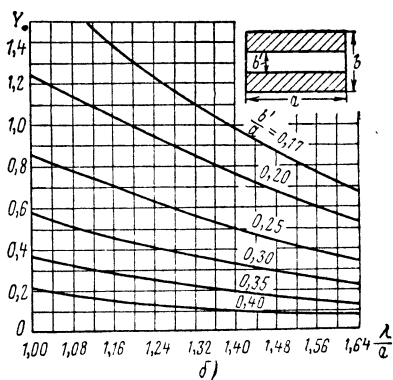
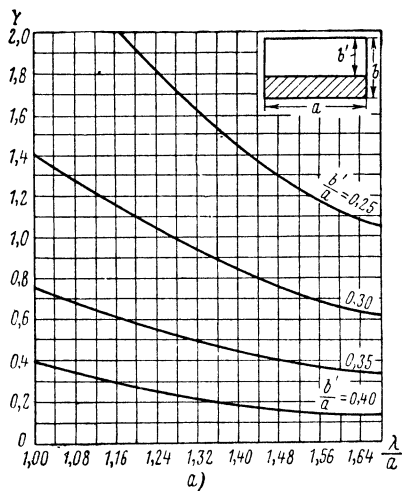


Рис. 58.

имеем

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

$$= \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{в}} \cdot \frac{\lambda_{в}}{4}\right)}} = 3,31 \text{ мм.}$$

Этой действующей высоте соответствует геометрическая высота l_1 , которая вычисляется по формуле

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

Отсюда находим

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

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

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

$$= \sqrt{\frac{50 \cdot 23 \cdot 10}{2 \cdot 524 \sin^2(0,25 \cdot 180)^\circ \sin^2 \frac{\pi}{2}}} = 4,68 \text{ мм,}$$

а

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

Принимаем радиус провода вибратора $r = 1,6 \text{ мм}$ и вычисляем волновое сопротивление вибратора

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

$$= 60 \cdot 1,88 = 112,8 \text{ ом.}$$

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

$$X_{из} = -Z_{в.а} \operatorname{ctg} \beta l_1 = -112,8 \operatorname{ctg} \left(\frac{360 \cdot 7,56}{32} \right)^\circ =$$

$$= 112,8 \cdot 0,0875 = -9,87 \text{ ом.}$$

Для того чтобы компенсировать это сопротивление, нужно изменить расстояние l_2 от поршня до вибратора в соответствии с формулой (11.10)

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

откуда

$$\begin{aligned} \sin(2\beta_{\text{в}} l_2) &= \frac{-X_{\text{з}} ab}{h_{\text{д}}^2 Z_{\text{в}} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} y_0 \right)} = \\ &= \frac{9,87 \cdot 10 \cdot 23}{4,68^2 \cdot 524 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot 0,25a}{a} \right)} = 0,422; \\ 2\beta_{\text{в}} l_2 &= 115^\circ; \quad l_2 = \frac{44,5 \cdot 115}{2 \cdot 360} = 7,1 \text{ мм.} \end{aligned}$$

За счет неравенства $l_2 < \frac{\lambda_{\text{в}}}{4}$ 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.

11.43. Резонансная длина волны резонатора

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}} = \\ &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{23}\right)^2 + \left(\frac{0}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{23}\right)^2}} = 32,4 \text{ мм.} \end{aligned}$$

11.44. $\lambda_0 = 10$ см.

11.45. $\lambda_0 = \frac{4l}{2n+1}$, где $n=0, 1, 2, 3 \dots$

11.46. $l = n \frac{\lambda_0}{2}$, где $n=1, 2, 3 \dots$ — число полуволн, укладываемых по длине резонатора.

11.47. $l = 0,8$ см.

11.48. $k = 1,068$; $v_{\text{ф}} = 2,8 \cdot 10^8$ м/сек.

К ГЛАВЕ XII

12.1. $D = k_1 \frac{l_a}{\lambda} \approx 7 \frac{6}{6} = 7$.

12.2. Средний диаметр стержня.

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{max}} + d_{\text{min}}}{2} = \frac{5 + 3,5}{2} = 4,25 \text{ см.}$$

По графику (см. рис. 30) находим, что при $\frac{d}{\lambda} = \frac{4,25}{10} = 0,425$ и $\varepsilon = 2,5$ отношение $v_{\phi}/c = 0,91$. Это соответствует коэффициенту замедления $k = c/v_{\phi} = 1,1$.

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

12. 4. $v_{\phi} = 2,727 \cdot 10^8 \text{ м/сек}; \quad D \approx 37,5.$

12. 5. 1. Сначала определяем ориентировочное значение длины стержня l_a , поскольку этот размер антенны в первую очередь ограничивает возможность ее осуществления. Среднее значение к. п. д. диэлектрической антенны $\eta_a = 0,85$ и потому коэффициент направленного действия должен быть не менее

$$D = \frac{G}{\eta_a} = \frac{30}{0,85} = 35.$$

Для получения $D \approx 35$ стержень оптимальных размеров должен согласно (12.2) иметь длину

$$l_a = \frac{D \cdot \lambda}{7 + 8} = \frac{35 \cdot 7}{7,5} = 32,6 \text{ см}.$$

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

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

Так как средний диаметр равен $d = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} = \frac{2 + 3,2}{2} = 2,6 \text{ см}$, а отношение $\frac{d}{\lambda} = \frac{2,6}{7} = 0,37$, то согласно рис. 30 фазовая скорость в стержне равна $v_{\phi} = 0,91 c = 0,91 \cdot 3 \cdot 10^8 = 2,79 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$.

Этой скорости соответствует коэффициент замедления $k = \frac{c}{v_{\phi}} = \frac{1}{0,92} = 1,1$ и длина волны в стержне $\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{k} = \frac{7}{1,1} = 6,3 \text{ см}$.

Уточняем длину стержня l_a из формулы (10.10), находим

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

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

$$\alpha = 2729 \varepsilon \frac{R}{\lambda} \operatorname{tg} \delta.$$

Имеющийся в формуле коэффициент R определяется по кривым, изображенным на рис. 59, согласно относительной диэлектрической проницаемости материала стержня $\varepsilon=2,5$ и отношения $\frac{d}{2\lambda}=0,18$.

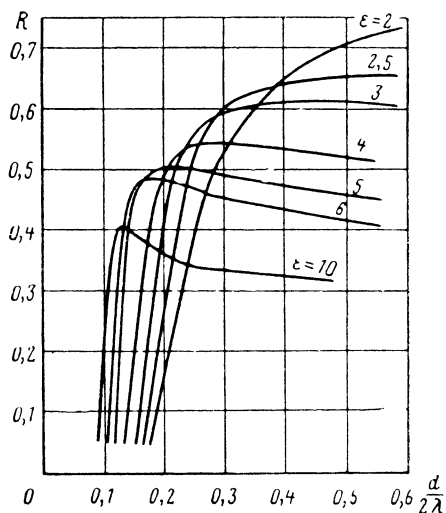


Рис. 59.

Этот коэффициент равен $R=0,18$. Следовательно,

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

Отсюда находим к. п. д. антенны (см. приложение VII)
 $\eta_a = e^{-2\alpha l_a} = e^{-2 \cdot 0,175 \cdot 0,35} = e^{-0,1225} = 0,885.$

Коэффициент направленного действия в соответствии с (12.2) равен

$$D = (7+8) \frac{l_a}{\lambda} = 7,5 \frac{35}{7} = 37,5.$$

Коэффициент усиления антенны

$$G = D\eta_a = 37,5 \cdot 0,885 \approx 33,1.$$

Это удовлетворяет заданию.

4. Диаграмму направленности антенны рассчитываем по уравнению, которое для вертикальной плоскости (плоскости E) записывается следующим образом:

$$F'(\varphi) = A' \frac{\sin \frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)} = \cos \varphi \frac{\sin \frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)},$$

где φ — угол между данным направлением и осью стержня.

Для горизонтальной плоскости (плоскости H) уравнением диаграммы направленности является

$$F''(\varphi) = A'' \frac{\sin \frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)} = \frac{\sin \frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}.$$

В уравнениях $F'(\varphi)$ и $F''(\varphi)$ множители A' и A'' выражают направленные свойства элементарного излучателя.

По диаграммам направленности определяем их ширину.

12.6. 1. Определяем среднюю длину волны рабочего диапазона

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

Длину витка спирали принимаем равной средней длине волны, так как антенна должна иметь максимум излучения вдоль оси спирали,

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

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

Определяем шаг намотки.

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

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 $k = c/v_c \approx 1,2$. Отсюда

$$k = 1 + \frac{\lambda_{min}}{2l_a} = 1,2,$$

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 семи и уточняем осевую длину спирали

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

Вычисляем коэффициент усиления антенны по (12.5) на низшей, средней и высшей длине волны

$$G_n \approx D_n = 15 \left(\frac{l_c}{\lambda_{\min}} \right)^2 \frac{l_a}{\lambda_{\min}} = 15 \left(\frac{8}{6} \right)^2 \frac{14,5}{6} = 64,3 = 18,1 \text{ дб};$$

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

$$G_v \approx D_v = 15 \left(\frac{l_c}{\lambda_{\max}} \right)^2 \frac{l_a}{\lambda_{\max}} = 15 \left(\frac{8}{10} \right)^2 \frac{14,5}{10} = 17,4 = 12,4 \text{ дб}.$$

Ширина диаграммы направленности согласно (12.4) равна

$$2\varphi'_n = \left(\frac{52}{\frac{l_c}{\lambda_{\min}} \sqrt{\frac{l_a}{\lambda_{\min}}}} \right)^\circ = \frac{52}{\frac{8}{6} \sqrt{\frac{14,5}{6}}} = 25,1^\circ;$$

$$2\varphi'_{\text{ср}} = \left(\frac{52}{\frac{l_c}{\lambda_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{l_a}{\lambda_{\text{ср}}}}} \right)^\circ = \frac{52}{\frac{8}{8} \sqrt{\frac{14,5}{8}}} = 38,8^\circ;$$

$$2\varphi'_v = \left(\frac{52}{\frac{l_c}{\lambda_{\max}} \sqrt{\frac{l_a}{\lambda_{\max}}}} \right)^\circ = \frac{52}{\frac{80}{10} \sqrt{\frac{14,5}{10}}} = 54,2^\circ.$$

Диаграмма направленности строится по уравнению

$$F(\varphi) = \frac{\sin \frac{\pi l_a}{\lambda_{\text{ср}}} (k_{\text{ср}} - \cos \varphi)}{\frac{\pi l_a}{\lambda_{\text{ср}}} (k_{\text{ср}} - \cos \varphi)},$$

где $k_{\text{ср}} = 1 + \frac{\lambda_{\text{ср}}}{2l_a}$ соответствует средней длине волны $\lambda_{\text{ср}}$.

Входное сопротивление антенны в соответствии с формулой (12.6) равно

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

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

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

12. 7. $2\varphi' = 26^\circ$; $D = 60$; $R_{\text{вх}} \approx 140 \text{ ом}.$

12.8. 1. Определяем длину замедляющей структуры l_a исходя из формулы (12.2)

$$l_a = \frac{D\lambda_{cp}}{7 \div 8} = \frac{31,3}{7,5} = 13,6 \text{ см.}$$

2. Оптимальный коэффициент замедления волны

$$k = 1 + \frac{\lambda_{cp}}{2l_a} = 1 + \frac{3}{2 \cdot 13,6} = 1,105.$$

3. Фазовая скорость волн в замедляющей структуре

$$v_{\phi} = \frac{c}{k} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,105} = 2,715 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

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

$$s = t = 0,05 \lambda_{cp} = 0,05 \cdot 3 = 0,15 \text{ см} = 1,5 \text{ мм.}$$

Высоту выступов h определяем на основании формулы (11.13)

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

откуда

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

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

5. Рассчитываем диаграмму направленности антенны в плоскости E по уравнению

$$F(\theta) = \cos \theta \frac{\sin \left[\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \theta) \right]}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \theta)}$$

и в плоскости H по уравнению

$$F(\varphi) = \frac{\cos \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi \right)}{1 - \left(\frac{2a}{\lambda} \sin \varphi \right)^2} \frac{\sin \left[\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \theta) \right]}{\frac{\pi l_a}{\lambda} (k - \cos \varphi)}.$$

6. Строим диаграммы и определяем по ним ширину диаграмм на уровне 0,707 от максимального.

12.9. $l_a \approx 20 \text{ см}; k = 1,125.$

12.10. 1. Выбираем стандартный волновод с внутренними размерами $a = 23 \text{ мм}, b = 10 \text{ мм}.$

Длина волны в волноводе

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

Волновое сопротивление волновода

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

Волновая проводимость волновода

$$g_{\text{в}} = \frac{1}{Z_{\text{в}}} = 0,188 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ом.}$$

Определяем число щелей в волноводе по формуле (12. 7)

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

Используем продольные полуволновые щели, прорезанные на широкой стенке волновода с интервалом в половину длины волны $\lambda_{\text{в}}/2$ (рис 27).

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

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

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

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

Если щелей N , то $g_{\text{щ}} = \frac{1}{N}$. В данном случае $g_{\text{щ}} = \frac{1}{4} = 0,25$.

Отсюда определяем x_1 :

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) &= \sqrt{\frac{g_{\text{щ}}}{2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_{\text{в}}}{\lambda} \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_{\text{в}}}\right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10 \cdot 32}{2,09 \cdot 23 \cdot 45 \cos^2\left(\frac{180 \cdot 32}{2 \cdot 45}\right)}} = 0,4386; \\ x_1 &= \frac{a}{180^\circ} (\arcsin 0,4386)^\circ = \frac{23 \cdot 26}{180} = 3,3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

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

$$U_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}/n}{g'_{\text{щ}}}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}}} = 5,2 \cdot 10^3 \text{ в} = 5,2 \text{ кВ.}$$

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

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

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

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

4. Для определения волнового сопротивления эквивалентного вибратора обратимся к формуле (8.14)

$$\begin{aligned} Z_{\text{в.э}} &= 120 \left(\ln \frac{l}{2r_{\text{э}}} - 1 \right) = 120 \left(2,3 \lg \frac{\lambda_{\text{в}}}{4r_{\text{э}}} - 1 \right) = \\ &= 120 \left(2,3 \lg \frac{45}{4 \cdot 1,1} - 1 \right) \approx 160 \text{ ом.} \end{aligned}$$

Геометрическая длина щели с учетом эффекта укорочения определяется по формуле (8.16)

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

5. Расчет диаграммы направленности 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 $\lambda_{\text{в}}/2$,

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin \frac{n\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}},$$

где θ — угол между данным направлением и перпендикуляром к широкой стенке волновода;

n — число щелей.

$$\psi = \beta \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{2} \sin \theta \right) = \left(\frac{360}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} \sin \theta \right)^{\circ} = \left(\frac{360}{3,2} \cdot \frac{4,5}{2} \sin \theta \right)^{\circ} = (252 \sin \theta)^{\circ} -$$

сдвиг по фазе, обусловленный разностью хода волн от двух соседних щелей, которая равна $\frac{\lambda_B}{2} \sin \theta$.

Итак,

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

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

12.11. $G \approx 19$.

12.12. $G = 7,6$.

12.13. $b' = 22$ см; $l = 46$ см.

12.14. 1. Размеры рупора в горловине определяются внутренними размерами волновода $a = 22,86$ мм; $b = 10,16$ мм.

Определяем площадь раскрыва рупора S_a из формулы 12.11

$$G = 6 \frac{a' b'}{\lambda^2} = 6 \frac{S_a}{\lambda^2};$$

$$S_a = \frac{G \lambda^2}{6} = \frac{40 \cdot 9}{6} = 60 \text{ см}^2.$$

2. Определяем размеры сторон раскрыва рупора a' , b' , исходя из оптимального соотношения между ними (12.11):

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

откуда

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

3. Определяем длину рупора на основании (12.11)

$$l = 0,3 \frac{(a')^2}{\lambda} = \frac{0,3 \cdot 8,7^2}{3} = 9,3 \text{ см}.$$

4. Определяем расстояние от фазового центра до ближайшей точки раскрыва (см. фиг. 28, в):
в плоскости E

$$R_E = \sqrt{l^2 - \left(\frac{b'}{2}\right)^2} = \sqrt{9,3^2 - \left(\frac{6,9}{2}\right)^2} = 8,6 \text{ см};$$

в плоскости H

$$R_H = \sqrt{l^2 - \left(\frac{a'}{2}\right)^2} = \sqrt{9,3^2 - \left(\frac{8,7}{2}\right)^2} = 8,2 \text{ см}.$$

5. Определяем максимальный сдвиг по фазе на краях раскрыва рупора

$$\xi_{\max} = \frac{\pi}{4\lambda} \left(\frac{b'^2}{R_E} + \frac{a'^2}{R_H} \right) = \frac{\pi}{4 \cdot 3} \left(\frac{6,9^2}{8,6} + \frac{8,7^2}{8,2} \right) = 0,46\pi + 0,77\pi.$$

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

6. Диаграммы направленности рассчитываем, полагая, что поле в раскрыве рупора синфазно. В плоскости E уравнение диаграммы будет

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

а в плоскости H

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

где φ_E , φ_H — углы между данным направлением и соответственно векторами E и H на оси рупора в его раскрыве.

7. Ширину диаграммы направленности можно определить по построенным диаграммам или по формулам (12.11)

$$2\varphi'_E = \left(53 \frac{\lambda}{b'} \right)^\circ = \frac{53 \cdot 3}{6,9} = 23^\circ; \\ 2\varphi'_H = \left(80 \frac{\lambda}{a'} \right)^\circ = \frac{80 \cdot 3}{8,7} = 27,5^\circ.$$

12. 15. $b' = 26,3$ см; $a' = 32,9$ см; $G = 64,1$.

12. 16. $\theta = 19^\circ 24'$; $d = 26,4$ см.

12. 17. $G = 55,6$; $2\varphi'_E = 18,2^\circ$; $2\varphi'_H = 21,2^\circ$.

12. 18. $2\varphi'_E = 162,5^\circ$; $2\varphi'_H = 26,7^\circ$.

12. 19. $2\varphi'_E = 7,5^\circ$; $2\varphi'_H = 95,8^\circ$.

12. 20. $2\varphi'_E = 18,1^\circ$; $2\varphi'_H = 22,2^\circ$.

12. 21. $D = 4950$.

12. 22. $\psi = 35^\circ$.

12. 23. $2\varphi'_E = 3^\circ 45'$; $2\varphi'_H = 3^\circ 30'$.

12. 24. Определяем толщину незонированной линзы

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

Ширина ступеньки зонированной линзы

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

а толщина всей зонированной линзы

$$m = m' + m'' = 10 + 2 = 12 \text{ см}.$$

12. 25. В 1,6 раза.

12. 26. $\Delta f_{\text{пр}} = 150 \text{ МГц}$.

12. 27. Определяем показатель преломления линзы

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

Определяем толщину линзы

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

12. 28. $m = 17,2 \text{ см}$.

12. 29. $a_{\text{пл}} = 2,3 \text{ см}$.

12. 30. 2,1.

12. 31. 5,52.

12. 32. Определяем геометрическую площадь S_a раскрыва рефлектора:

$$S_a = \frac{D\lambda^2}{4\pi\gamma} = \frac{400 \cdot 9}{4\pi \cdot 0,6} = 477,7 \text{ см}^2.$$

Диаметр параболоида будет

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

Определяем фокусное расстояние, пользуясь формулой

$$f = \frac{d \operatorname{ctg} \psi}{4} = \frac{24,7 \operatorname{ctg} 30^\circ}{4} = \frac{24,7 \cdot 1,73}{4} = 10,7 \text{ см}.$$

12. 33. $\psi = 35,5^\circ$.

12. 34. Геометрическая поверхность раскрыва параболоида

$$S_a = \frac{\lambda^2}{4\pi\gamma} D = \frac{144 \cdot 350}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,55} = 7295 \text{ см}^2.$$

Диаметр параболоида

$$d = \sqrt{\frac{4S_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7295}{3,14}} = 96,4 \text{ см}.$$

Фокусное расстояние

$$f = \frac{d \operatorname{ctg} \psi}{4} = \frac{96,4 \cdot 1,6}{4} = 38,6 \text{ см.}$$

Расстояние между вибратором и контррефлектором

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

Определяем диаметр контррефлектора

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

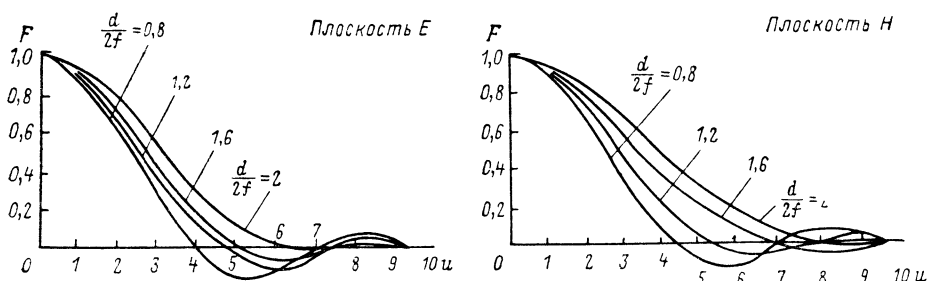


Рис. 60.

Рассчитываем нормированные диаграммы направленности антенны для плоскостей E и H . При этом пользуемся графиками, приведенными на рис. 60. Каждому графику соответствует постоянная величина, равная отношению радиуса раскрыва параболоида $d/2$ к фокусному расстоянию f . В данном случае

$$\frac{d}{2f} = \frac{96,4}{2 \cdot 38,6} = 1,25.$$

Аргументом функций, изображенных на рис. 60, является переменная величина $u = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$, где θ — угол относительно оси параболоида. Графиками, приведенными на рис. 60, можно пользоваться при расчете параболических антенн с любым облучателем, диаграмма направленности которого близка диаграмме направленности элементарного вибратора в соответствующей плоскости. Результаты расчета диаграмм направленности приведены в табл. 24.

Таблица 24

θ°	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16
$\sin \theta$	0	0,0175	0,0349	0,0523	0,0698	0,1045	0,1392	0,1736	0,2079	0,2419	0,2756

θ°	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16
$u = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$	0	0,456	0,909	1,362	1,818	2,722	3,626	4,522	5,416	6,301	7,179
$F(\theta)_H$	1,00	0,94	0,86	0,81	0,73	0,43	0,21	0,05	-0,05	-0,10	0
$F(\theta)_E$	1,00	0,95	0,91	0,82	0,74	0,56	0,31	0,11	0	-0,06	0,05

Полученные диаграммы согласуются с формулами ширины диаграммы направленности, измеренной на уровне 0,707 от максимальной напряженности поля:

$$2\theta'_E \approx \left(75 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ = 75 \frac{12}{96,4} = 9,3^\circ;$$

$$2\theta'_H \approx \left(70 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ = 70 \frac{12}{96,4} = 8,7^\circ.$$

12.35. 1. Определяем размеры поперечного сечения рупора в месте соединения его с волноводом (рис. 61).

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

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

2. Определяем геометрическую площадь раскрыва рупора S_a .

Так как коэффициент полезного действия рупорной антенны η_a близок к 100%, то коэффициент направленного действия

$$D = \frac{G}{\eta_a} \approx G = 15.$$

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

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

$$D_E = \frac{4\pi}{\lambda^2} \gamma_E S_a = \frac{4\pi}{8^2} 1 \cdot S_a = 0,2 S_a.$$

Следовательно, общий коэффициент направленного действия антенны

$$D = \sqrt{D_E D_H} = \sqrt{0,2 \cdot 0,16 S_a^2} = 0,18 S_a,$$

а геометрическая поверхность антенны

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

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

$$a' = \frac{S_a}{b'} = \frac{83}{2,6} = 31,9 \text{ см}.$$

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

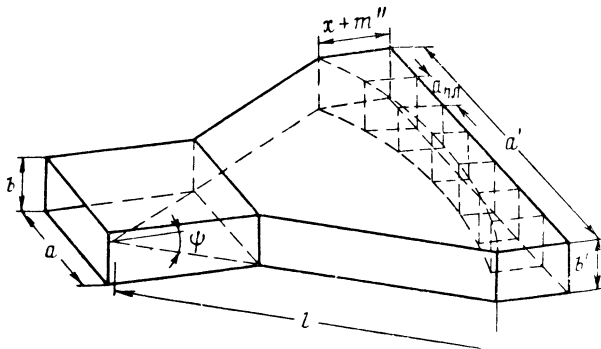


Рис. 61.

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

6. Определяем длину рупора l . Из рис. 61 видно, что $\sin \psi = \frac{a'}{2l}$. Отсюда находим

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

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

$$\begin{aligned} m' &= \frac{f}{1+n} - \sqrt{\left(\frac{f}{1+n}\right)^2 - \frac{a'^2}{4(1-n^2)}} = \\ &= \frac{37,7}{1+0,5} - \sqrt{\left(\frac{37,7}{1+0,5}\right)^2 - \frac{31,9^2}{4(1-0,25)}} = 8 \text{ см}. \end{aligned}$$

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

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

отсюда

$$a_{\text{пл}}' = \frac{\lambda}{2\sqrt{1-n^2}} = \frac{8}{2\sqrt{1-0,25}} = 4,7 \text{ см.}$$

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 до $a' = 7a_{\text{пл}} = 7 \cdot 4,7 = 32,9 \text{ см}$, а длину рупора — до

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

Фокусное расстояние сохраняем прежним.

10. Определяем длину x каждой пластины линзы. При этом исходим из уравнения профиля ускоряющей линзы (12. 17)

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

которое в данном случае имеет вид

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

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 $y = \pm \frac{a'}{2}$; $\pm \left(\frac{a'}{2} - a_{\text{пл}}\right)$; $\pm \left(\frac{a'}{2} - 2a_{\text{пл}}\right) \dots$ и результаты расчета сводим в табл. 25.

Таблица 25

у в см	±16,45	±11,75	±7,05	±2,35
х в см	8,4	4,0	1,3	0,15

К полученным значениям x следует прибавить постоянную величину m'' (принимая $m'' = 2 \text{ см}$).

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

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

$$2\varphi'_H \approx \left(1,2 \frac{\lambda}{a'}\right)_{\text{рад}} = \left(57,3 \cdot 1,2 \frac{\lambda}{a'}\right)^\circ = \left(68,8 \frac{8}{31,9}\right)^\circ = 17,3^\circ,$$

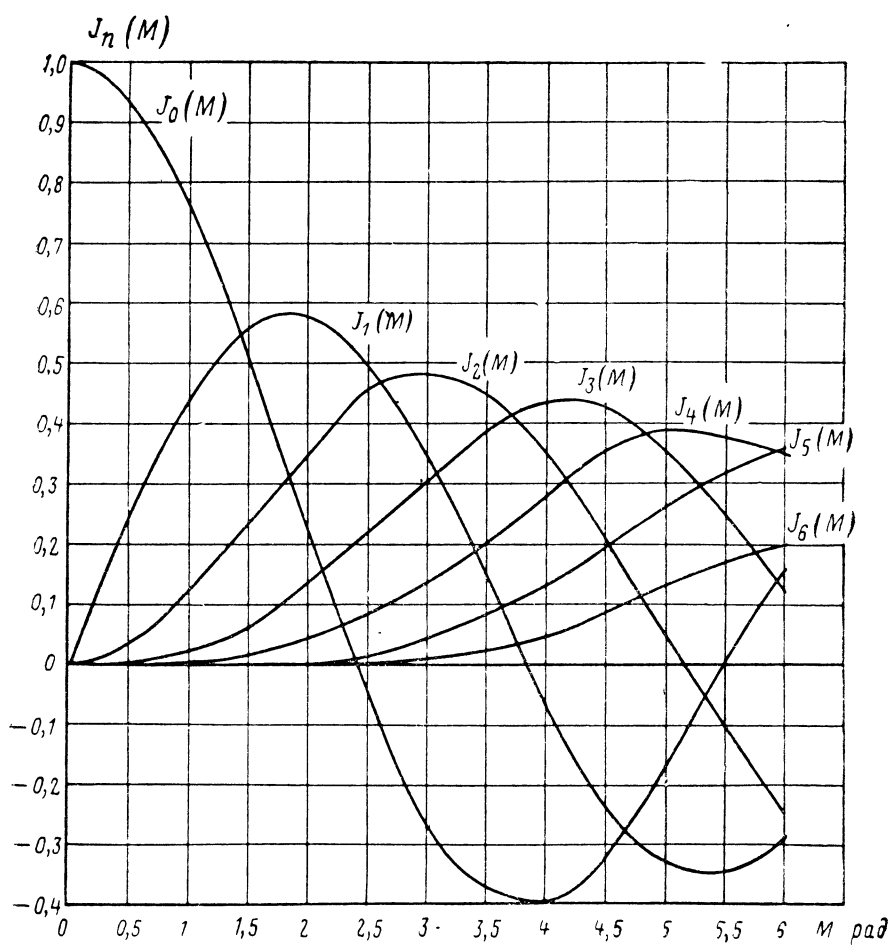
а в плоскости E

$$2\varphi'_E \approx \left(0,88 \frac{\lambda}{b'}\right)_{\text{рад}} = \left(57,3 \cdot 0,88 \frac{\lambda}{b'}\right)^\circ = \left(51 \frac{8}{2,6}\right)^\circ = 157^\circ.$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

ФУНКЦИИ БЕССЕЛЯ



ДАННЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Марка кабеля	Волновое сопротив- ление ом		Расчетное затухание на частоте 1000 Мгц дБ/м	Наружный диаметр мм	Диаметр внутрен- него провода мм	Диаметр по изо- ляции мм	Максималь- ное рабочее напряжение кВ
РК-1	75	80	0,39	$7,3 \pm 0,4$	0,68	4,6	3,0
РК-2	90	95	0,26	$9,6 \pm 0,8$	0,68	6,8	4,5
РК-3	72	77	0,22	$13 \pm 0,8$	1,37	9,0	5,5
РК-4	50	55	0,33	$11 \pm 0,7$	1,37	9,0	5,6
РК-6	50	55	0,28	$12,4 \pm 0,8$	2,55	9,2	4,5
РК-8	72	78	0,1	21 ± 1	2,73	18,0	8,5
РК-19	50	55	0,73	$4,2 \pm 0,3$	0,68	2,4	1,0
РК-20	74	80	0,28	$10,4 \pm 0,6$	1,11	7,2	1,0
РК-28	50	55	0,3	$11,1 \pm 0,7$	2,13	7,3	1,5
РК-29	48	53	0,39	$9,8 \pm 0,6$	1,37	4,8	1,5
РК-47	50	55	0,3	$10,3 \pm 0,3$	2,13	7,3	1,0
РК-48	48	53	0,24	$13,5 \pm 0,5$	3,09	10,5	8,0
РК-49	67	73	0,41	$6,8 \pm 0,2$	0,78	4,2	1,0
РК-50	—	—	0,35	$8,8 \pm 0,3$	0,30	6,2	—
РК-55	51	56	0,49	5,2	0,81	2,95	1,5
РК-56	—	—	0,41	6,4	0,64	3,9	1,0
РК-59	51	56	0,49	5,5	0,81	3,15	2,0

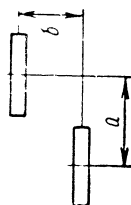
ТАБЛИЦА ДЛЯ РАСЧЕТА ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ЧЕБЫШЕВСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СОГЛАСОВАНИЯ

N	$p_{\max} = 0,02$				$p_{\max} = 0,05$				$p_{\max} = 0,1$			
	$\frac{Z'_g}{Z_{g1}}$	$\frac{Z''_g}{Z_{g1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	$\frac{Z'_g}{Z_{g1}}$	$\frac{Z''_g}{Z_{g1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	$\frac{Z'_g}{Z_{g1}}$	$\frac{Z''_g}{Z_{g1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$
1,2	1,057	1,135	0,148	2,388	1,073	1,119	0,0907	4,513	—	—	—	—
1,4	1,099	1,274	0,174	1,875	1,102	1,271	0,132	2,792	1,144	1,224	0,084	4,954
1,6	1,136	1,407	0,186	1,695	1,153	1,387	0,150	2,343	1,183	1,353	0,110	3,561
1,8	1,170	1,538	0,192	1,601	1,188	1,516	0,160	2,126	1,218	1,478	0,124	3,021
2,0	1,201	1,665	0,197	1,538	1,219	1,640	0,167	1,993	1,250	1,600	0,134	2,725

N	$p_{\max} = 0,02$				$p_{\max} = 0,05$				$p_{\max} = 0,1$			
	$\frac{Z'_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{Z''_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	$\frac{Z'_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{Z''_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	$\frac{Z'_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{Z''_\theta}{Z_{\theta 1}}$	$\frac{l}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$
2,2	1,230	1,789	0,200	1,496	1,245	1,760	0,172	1,902	1,277	1,720	0,141	2,537
2,4	1,257	1,909	0,203	1,461	1,271	1,880	0,176	1,837	1,304	1,840	0,147	2,402
2,6	1,283	2,027	0,205	1,437	1,297	2,000	0,180	1,783	1,330	1,950	0,151	2,300
2,8	1,307	2,147	0,207	1,418	1,323	2,110	0,182	1,744	1,357	2,060	0,155	2,222
3,0	1,329	2,256	0,208	1,400	1,349	2,223	0,184	1,710	1,384	2,168	0,158	2,159
3,2	1,351	2,369	0,210	1,385	1,370	2,340	0,187	1,680	1,404	2,280	0,161	2,103
3,4	1,372	2,479	0,211	1,372	1,390	2,440	0,188	1,656	1,425	2,380	0,163	2,058
3,6	1,391	2,587	0,212	1,361	1,410	2,550	0,190	1,634	1,446	2,490	0,165	2,020
3,8	1,410	2,694	0,213	1,352	1,430	2,660	0,191	1,615	1,466	2,590	0,167	1,987
4,0	1,428	2,800	0,213	1,343	1,450	2,758	0,192	1,599	1,487	2,691	0,169	1,955
4,2	1,446	2,905	0,214	1,336	1,467	2,860	0,194	1,582	1,504	2,790	0,171	1,929
4,4	1,463	3,008	0,215	1,329	1,483	2,960	0,195	1,569	1,521	2,890	0,172	1,905
4,6	1,479	3,110	0,215	1,322	1,500	3,060	0,195	1,558	1,538	2,990	0,174	1,881
4,8	1,495	3,211	0,216	1,315	1,517	3,160	0,196	1,545	1,555	3,080	0,175	1,863
5,0	1,510	3,311	0,216	1,310	1,533	3,261	0,197	1,536	1,572	3,180	0,176	1,843
5,2	1,525	3,410	0,217	1,304	1,548	3,360	0,198	1,525	1,587	3,280	0,177	1,829
5,4	1,540	3,507	0,217	1,299	1,562	3,450	0,199	1,517	1,602	3,360	0,178	1,812
5,6	1,554	3,604	0,218	1,296	1,576	3,550	0,199	1,508	1,616	3,460	0,179	1,798
5,8	1,567	3,700	0,218	1,291	1,590	3,650	0,200	1,500	1,631	3,550	0,180	1,784
6,0	1,581	3,795	0,219	1,287	1,605	3,739	0,200	1,494	1,646	3,646	0,180	1,770
6,2	1,594	3,890	0,219	1,284	1,618	3,830	0,201	1,487	1,658	3,730	0,181	1,759
6,4	1,606	3,984	0,219	1,280	1,630	3,930	0,202	1,479	1,671	3,830	0,182	1,749
6,6	1,619	4,077	0,220	1,277	1,643	4,020	0,202	1,473	1,684	3,920	0,183	1,738
6,8	1,631	4,169	0,220	1,274	1,656	4,110	0,203	1,469	1,697	4,010	0,183	1,728
7,0	1,643	4,261	0,220	1,270	1,669	4,194	0,203	1,463	1,710	4,093	0,184	1,720
7,2	1,654	4,352	0,221	1,267	1,680	4,280	0,203	1,457	1,722	4,180	0,184	1,710
7,4	1,666	4,442	0,221	1,266	1,690	4,370	0,204	1,453	1,733	4,270	0,185	1,702
7,6	1,677	4,531	0,221	1,262	1,701	4,460	0,204	1,447	1,745	4,350	0,186	1,695
7,8	1,688	4,621	0,221	1,259	1,712	4,550	0,205	1,443	1,756	4,440	0,186	1,687

ЗНАЧЕНИЕ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЗАИМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОЛУВОЛНОВЫХ ВИБРАТОРОВ

$\frac{b}{a}$	0,0λ	0,5λ	1,0λ	1,5λ	2,0λ	2,5λ	3,0λ	3,5λ	4,0λ	4,5λ	5,0λ	5,5λ	6,0λ
0,0λ	+73,1	-12,4	+4,1	-1,8	+1,2	-0,8	+0,4	-0,3	+0,2	-0,2	+0,2	-0,1	+0,1
0,5λ	+26,4	-11,8	+8,8	-5,8	+3,8	-2,8	+1,9	-1,5	+1,1	-0,9	+0,7	-0,6	+0,5
1,0λ	-4,1	-0,8	+3,5	-6,3	+6,1	-5,7	+4,5	-4,0	+3,1	-2,5	+2,1	-1,8	+1,6
1,5λ	+1,8	+0,8	-2,9	+2,0	+0,2	-2,4	+3,2	-3,8	+3,7	-3,4	+3,1	-2,9	+2,6
2,0λ	-1,0	-1,0	+1,1	+0,6	-2,6	+2,7	-2,1	+0,7	+0,5	-1,3	+1,8	-2,2	+2,3
2,5λ	+0,6	+0,5	-0,4	-1,0	+1,6	-0,3	-1,6	+2,7	-2,5	+2,0	-1,4	+0,5	-0,1
3,0λ	-0,4	-0,3	+0,1	+0,9	-0,5	-0,1	+1,7	-1,0	-0,1	+1,1	-1,9	+1,8	-2,0



ДАННЫЕ СИНФАЗНО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АНТЕНН

Тип антенны (СГ $\frac{n}{p}$ Р)	$R_{\Sigma a}$ ом	D	G	$2\varphi'$ град	$2\theta'$ град	$\delta_{\max}$ град	$\Delta\lambda$
СГ $\frac{1}{4}$ Р	514	43	26	28	32	30	—
СГ $\frac{2}{4}$ Р	1117	60	37	28	20	17	$(0,9 \div 1,2) \lambda_0$
СГ $\frac{2}{8}$ Р	2300	116	71	12	20	17	$(0,9 \div 1,2) \lambda_0$
СГ $\frac{4}{8}$ Р	4359	262	160	12	10	9	$(0,95 \div 1,08) \lambda_0$
СГ $\frac{6}{8}$ Р	6705	375	211	12	7	7	$(0,96 \div 1,05) \lambda_0$

ДАННЫЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Внутренние размеры мм	Толщина стенки мм	Рабочий диапазон волн* см		Расчетное затухание** дБ/м	Максимальная пропускная мощность*** Мвт	
		$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$		$P_{\lambda \min}$	$P_{\lambda \max}$
23×10	1,5	—	4,1	0,126	1,18	0,6
28,5×12,6	1,5	3,0	5,1	0,096	1,83	0,94
35×15	1,5	3,7	6,3	0,07	2,7	1,18
40×20	2	4,2	7,2	0,053	4,1	2,1
48×24	2	5,0	8,6	0,044	5,9	3,0
58×25	2	6,1	10,4	0,035	7,4	3,8
72×34	2	7,6	13,0	0,025	12,5	6,4
90×45	2	9,5	16,2	0,017	20,7	10,6

* $\lambda_{\min}$ на 5% больше $\lambda_{кр}$ для волны H_{20} , а $\lambda_{\max}$ на 10% меньше $\lambda_{кр}$ для волны H_{10} .

** Расчет дан для меди ($\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ ом/м).

*** При напряжении пробоя по воздуху 30 кВ/см.

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ e^{-x}

x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}
0,00	1,000	0,13	0,878	0,26	0,771	0,38	0,684
0,01	0,990	0,14	0,869	0,27	0,763	0,39	0,677
0,02	0,980	0,15	0,861	0,28	0,756	0,40	0,670
0,03	0,970	0,16	0,852	0,29	0,748	0,41	0,664
0,04	0,961	0,17	0,844	0,30	0,741	0,42	0,657
0,05	0,951	0,18	0,835	0,31	0,733	0,43	0,650
0,06	0,942	0,19	0,827	0,32	0,726	0,44	0,644
0,07	0,932	0,20	0,819	0,33	0,719	0,45	0,638
0,08	0,923	0,21	0,811	0,34	0,712	0,46	0,631
0,09	0,914	0,22	0,802	0,35	0,705	0,47	0,625
0,10	0,905	0,23	0,794	0,36	0,698	0,48	0,619
0,11	0,896	0,24	0,787	0,37	0,691	0,49	0,613
0,12	0,887	0,25	0,779	—	—	0,50	0,606
—	—	—	—	—	—	—	—

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ЗАДАЧИ

Глава I. Общие сведения	3
Глава II. Свободные и вынужденные колебания в одиночном контуре . .	5
Глава III. Вынужденные колебания в связанных контурах и электрических фильтрах	18
Глава IV. Основы теории длинных линий	25
Глава V. Электромагнитные волны	41
Глава VI. Распространение радиоволн	44
Глава VII. Качественные и количественные характеристики антенн . . .	47
Глава VIII. Основы теории излучения и приема радиоволн	50
Глава IX. Длинноволновые и средневолновые антенны	59
Глава X. Коротковолновые антенны	63
Глава XI. Волноводы	68
Глава XII. Антенны ультракоротких волн	77

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

К главе I	86
К главе II	88
К главе III	100
К главе IV	108
К главе V	135
К главе VI	137
К главе VII	139
К главе VIII	139.
К главе IX	157
К главе X	161
К главе XI	167
К главе XII	176
Приложения	192

Григорий Бенционович Белоцерковский

ЗАДАЧИ И РАСЧЕТЫ ПО КУРСУ
«ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ И АНТЕННЫ»

Издательский редактор *Л. Ф. Ермилова*

Техн. редактор *Е. С. Балац*

Т-04799

Подписано в печать 6/V 1966 г.

Учетно-изд. л. 9,92

Формат бумаги $60 \times 90^{1/16} = 6,25$ бум. л.—12,50 печ. л.

Цена 43 коп. Тираж 50.000 экз. Тем. план 1964 г. № 58 Заказ 2932/1914

Московская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Хохловский пер., 7

43 коп.