



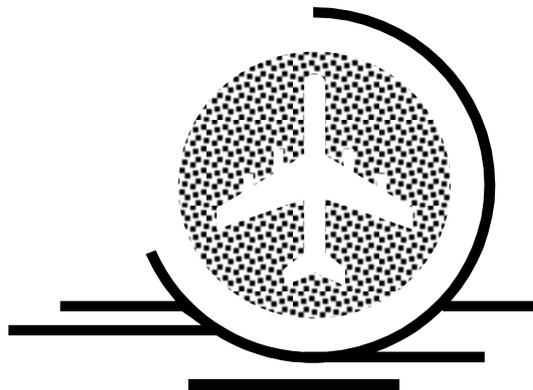
Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры

---

В.Г. Козлов

## АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Учебный практикум для студентов специальности 160905 –  
“Техническая эксплуатация транспортного радиооборудова-  
ния”



ТОМСК 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

В.Г. Козлов

## **АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ**

Учебный практикум для студентов специальности 160905 –  
“Техническая эксплуатация транспортного  
радиооборудования”

2012

**Рецензент:** профессор кафедры КИПР, д.т.н. Татаринов В.Н.

**Технический редактор:** доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.т.н. Озёркин Д.В.

**Козлов В.Г.**

Антенны и устройства СВЧ. Учебный практикум для студентов специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. 68 с.

Приведены основные расчетные формулы, примеры решения типовых задач и многовариантные задачи для самостоятельной работы. Рекомендуется использовать решения типовых задач при изучении соответствующих разделов лекционного курса, а многовариантные задания для самостоятельных и контрольных работ. Учебный практикум составлен для студентов специальности 160905, но может быть использован и студентами других специальностей радиотехнического профиля очной, заочной и дистанционной формы обучения.

© Козлов В.Г. 2012

© Кафедра КИПР Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 ТЕМА 1. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ В ВИДЕ ПРОВОЛОЧНЫХ И КО-</b>	
<b>АКСИАЛЬНЫХ ФИДЕРОВ.....</b>	<b>5</b>
1.1 Основные формулы для расчёта проволочных и коаксиальных фи-	
деров.....	5
1.2 Примеры решения типовых задач расчёта	
проволочных и коаксиальных фидеров .....	9
<b>1.3 Задачи для самостоятельной работы.....</b>	<b>11</b>
<b>2 ТЕМА 2. ВОЛНОВОДНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ.....</b>	<b>14</b>
2.1 Краткие сведения по расчету параметров волноводных линий пере-	
дач .....	14
2.1.1 Расчет параметров прямоугольных волноводов.....	14
2.1.2 Расчет параметров круглых волноводов.....	18
2.1.3 Расчет параметров <i>П</i> - и <i>Н</i> - волноводов.....	20
2.1.4 Расчет параметров полосковых волноводов.....	21
2.2 Примеры решения типовых задач.....	25
2.2.1 Примеры решения задач по расчету параметров прямоугольных	
волноводов.....	25
2.2.2 Примеры решения задач по расчету параметров круглых волно-	
водов.....	34
2.2.3 Пример решения задачи по расчёту параметров <i>П</i> и <i>Н</i> - волново-	
дов.....	42
2.2.4 Примеры решения задач по расчету параметров полосковых вол-	
новодов.....	42
2.3 Задачи для самостоятельной работы по расчету параметров волно-	
водных линий передач .....	52
2.3.1 Задачи по расчету параметров прямоугольных волноводов.....	52
2.3.2 Задачи по расчету параметров круглых волноводов.....	54
2.3.3 Задача по расчету параметров <i>П</i> - и <i>Н</i> - волноводов.....	55
2.3.4 Задачи по расчету параметров полосковых волноводов.....	56
<b>3 Тема 3. Энергетические соотношения в линиях</b>	
<b>передач.....</b>	<b>60</b>
3.1 Основные формулы для расчёта энергетических соотношений в ли-	
ниях передач.....	60
3.2 Примеры решения типовых задач расчёта энергетических соотно-	
шений в линиях передач.....	62
3.3 Задачи для самостоятельной работы.....	65
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>70</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Учебный практикум по курсу «Антенны и устройства СВЧ» содержит разработанные варианты практических занятий, построенных по единому принципу. В каждом его разделе вначале даются краткие теоретические сведения, затем приводятся подробные решения типовых задач и в заключение предлагаются многовариантные задания для самостоятельного решения каждым студентом. Цель данного практикума состоит в оказании помощи студентам в освоении лекционного курса и в выполнении контрольных работ. Так как расчёты антенн достаточно громоздки, то они осваиваются студентами при выполнении курсового проекта. На практических же занятиях студенты решают задачи расчёта устройств СВЧ, используемых в антеннах. В частности, они производят расчёт конструктивных и электрических параметров линий передач, рассчитывают энергетические соотношения в линиях передач и устройства согласования между входом линии передач и нагрузкой.

## 1 ТЕМА 1. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ В ВИДЕ ПРОВОЛОЧНЫХ И КОАКСИАЛЬНЫХ ФИДЕРОВ

### 1.1 Основные формулы для расчёта проволочных и коаксиальных фидеров

Линия передачи (ЛП) – это устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток электромагнитной энергии к нагрузке. В этом разделе будут рассмотрены только однородные, регулярные ЛП. Однородные ЛП заполнены однородной средой, а в регулярных ЛП в продольном направлении неизменны поперечное сечение и свойства среды [1]. Для передачи энергии в диапазонах длинных, средних, коротких и отчасти дециметровых волн применяют проволочные фидеры, а в диапазоне СВЧ закрытые и открытые волноводы.

В данном разделе рассмотрены ЛП в виде проволочных и коаксиальных фидеров. Эти ЛП характеризуются следующими параметрами: волновым сопротивлением  $W_{op}$ , активным погонным сопротивлением  $R_l$ , погонными ёмкостью  $C_l$  и индуктивностью  $L_l$ . Расчёт параметров для некоторых типов фидеров, выполненных из меди, можно проводить по формулам таблиц 1.1 и 1.21 [2]. Буквенные обозначения в этих формулах:  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, используемого в фидере,  $\lambda$  – длина волны, м,  $r_0$  – предельный радиус, определяемый из графика (рисунок 1.1), приведенного в [2]. Все размеры при использовании графика должны подставляться в мм.

Длина волны в фидере  $\lambda_\phi$ , распространяющейся вдоль однопроводного фидера определяется по формуле

$$\lambda_\phi = \lambda / \sqrt{1 + \lambda / 2 \cdot \pi \cdot r_0}^2. \quad (1.1)$$

Значения  $r$  и  $a$  в формулы для определения  $R_l$  подставляются в мм. Затухание  $\alpha$  (дБ/м) рассчитывают по формуле

$$\alpha \approx \frac{4.35 \cdot R_l}{W_{op}}, \quad (1.2)$$

а коэффициент укорочения волны в фидере (кроме однопроводного) по формуле

$$\xi = \sqrt{\varepsilon}. \quad (1.3)$$

В коаксиальном фидере из произвольного металла, заполненным диэлектриком с углом диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , затухание  $\alpha$  (дБ/м) рассчитывают по формуле [1, 5]

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_g, \quad (1.4)$$

где

$$\alpha_M = \frac{2.3 \cdot R_s \cdot 1 + D/d}{D \cdot \ln D/d}, \quad (1.5)$$

$$\alpha_g = \frac{27.30 \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{\lambda}, \quad (1.6)$$

$$D = 2r, \quad d = 2a, \quad (1.7)$$

$$R_s = 0.045 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\mu_M}{\lambda}}, \quad A = \sqrt{\frac{\sigma_{Cu}}{\sigma_M}}, \quad (1.8)$$

$\mu_M$  – относительная магнитная проницаемость металла,

$A$  – коэффициент, учитывающий отличие проводимости металла проводника  $\sigma_M$  от проводимости меди  $\sigma_{Cu}$  (для меди  $A=1$ , для серебра 0,98, для алюминия 1,35, для золота 1,2); длина волны  $\lambda$  берется в м.

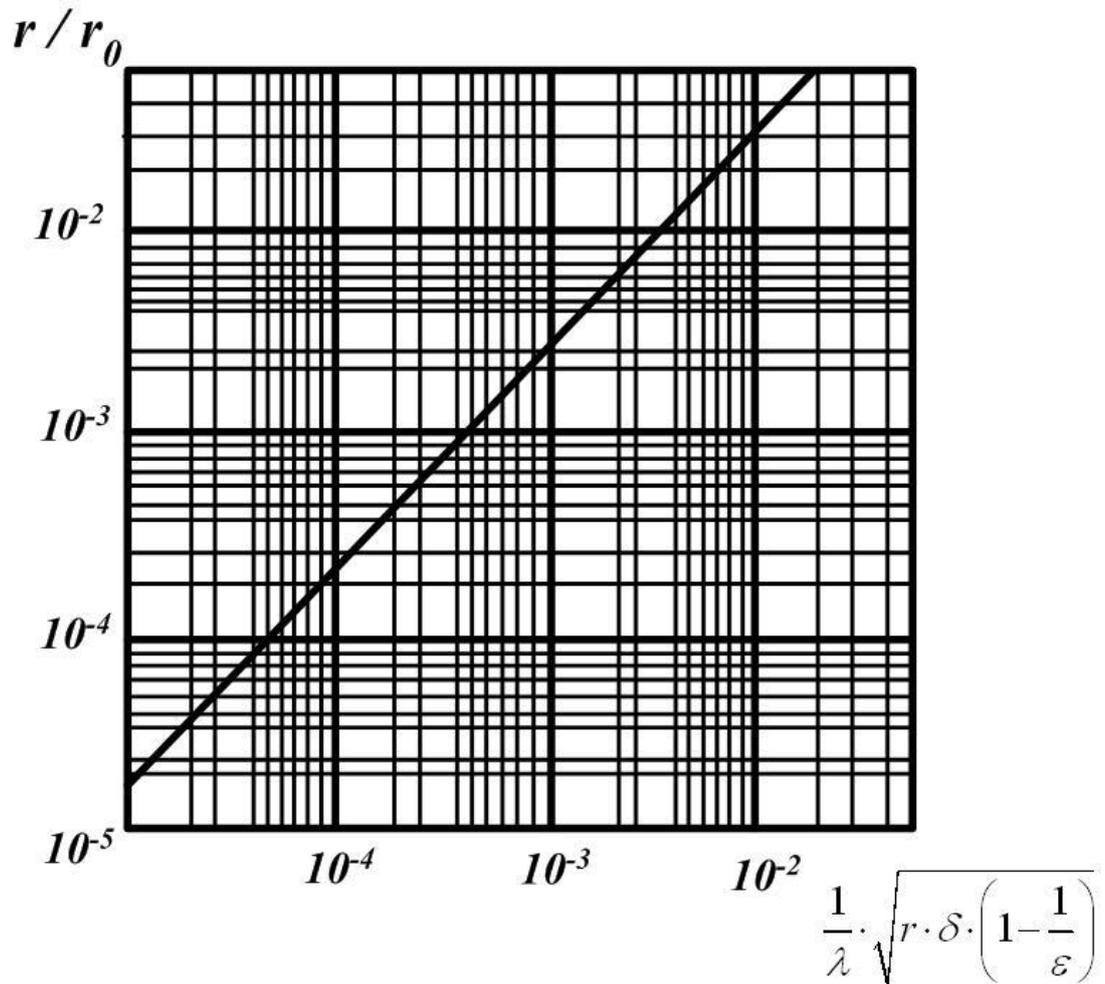


Рисунок 1.1 – График для определения отношения радиуса провода  $r$  однопроводного фидера, покрытого диэлектриком к предельному радиусу  $r_0$  [2]

Предельная мощность  $P_{np}$ , передаваемая по коаксиальному фидеру бегущей волной :

Таблица 1.1- Формулы для расчёта параметров однопроводного фидера, покрытого диэлектриком, и для двухпроводного фидера [2]

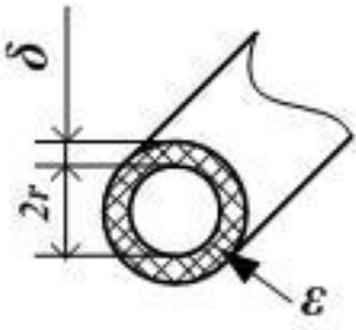
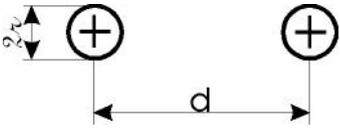
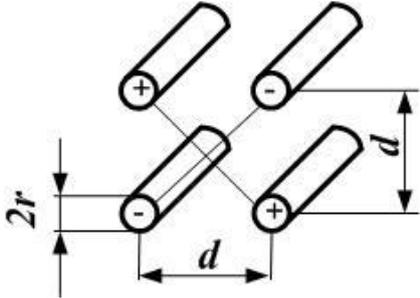
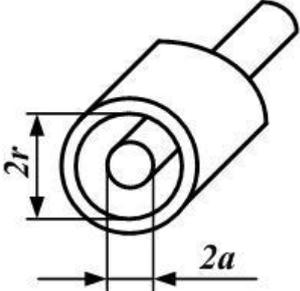
Параметр	Тип фидера	
	Однопроводной фидер, покрытый диэлектриком	Двухпроводной фидер
		
Ёмкость $C_l$ пФ/м	--	$\frac{12.1 \cdot \epsilon}{\lg d/r}$
Индуктивность $L_l$ , мкГн/м	--	$0.92 \cdot \lg d/r$
Сопротивление $R_l$ , Ом/м	$\frac{0.72}{r\sqrt{\lambda_\phi}}$	$\frac{1,44}{r\sqrt{\lambda}}$
Волновое сопротивление $W_\phi$ , Ом	$138 \cdot \lg 0.68 \cdot r_0/r$	$\frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \lg d/r$

Таблица 1.2- Формулы для расчёта параметров четырёхпроводного перекрещенного фидера и для коаксиального фидера [2]

Параметр	Тип фидера	
	Четырёхпроводный перекрещенный фидер	Коаксиальный фидер
		
Ёмкость $C_l$ пФ/м	$\frac{24,1 \cdot \varepsilon}{\lg 1,41d/r}$	$\frac{24,1\varepsilon}{\lg r/a}$
Индуктивность $L_l$ , мкГн/м	$0,46 \cdot \lg 1,41d/r$	$0,46 \lg r/a$
Сопротивление $R_l$ , Ом/м	$\frac{0,72}{r\sqrt{\lambda}}$	$\frac{0,72}{\sqrt{\lambda}} \cdot \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right)$
Волновое сопротивление $W_\phi$ , Ом	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \lg 1,41d/r$	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \lg r/a$

Примечание: Если в четырех проводной линии синфазными являются провода, лежащие по одну сторону от вертикали, то в приведенных формулах множитель 1,41 под знаком lg следует перенести из числителя в знаменатель [2]

$$P_{np} = \frac{U_{np}^2}{2 \cdot Z_{\phi}} = \frac{E_{np}^2 \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot d^2 \cdot \ln D/d}{480}, \quad (1.9)$$

где  $E_{np}$  – предельная пробивная прочность диэлектрика (для сухого воздуха  $E_{np} \approx 30$  кВ/см);  $U_{np}$  – пробивное напряжение. Максимум пробивного напряжения соответствует  $D/d = 2,718$  ( $Z_{\phi}=60$  Ом), максимум  $E_{np}$  при  $(D/d) = 1,65$  ( $Z_{\phi} = 30$  Ом), а минимум затухания в металле при  $(D/d)=3,6$  ( $Z_{\phi}=77$  Ом). Стандартные гибкие коаксиальные кабели имеют  $Z_{\phi}$  равные 50, 75, 100 или 200 Ом. Их эксплуатационные характеристики описаны в [3]. В [4] рекомендуют при расчете  $P_{np}$  при сплошном заполнении диэлектрика делать запас и в формуле (1,9) вместо  $E_{np}^2$  представлять значение  $(\frac{E_{np}^2}{\varepsilon})$ . Для линий с металлическими изоляторами  $E_{np}$  занижают при расчете  $P_{np}$  в 6-7 раз, а в коаксиалах с диэлектрическими изоляторами в 15-20 раз [3]. Чтобы не возникло паразитных типов волн должно соблюдаться условие [4,7]

$$\sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot D + d \leq \lambda_{\min} / 1.57, \quad (1.10)$$

где  $\lambda_{\min}$  – минимальная длина волны рабочего диапазона,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость диэлектрика.

## 1.2. Примеры решения типовых задач расчёта проволочных и коаксиальных фидеров

1.2.1. Двухпроводный медный фидер имеет волновое сопротивление  $W_{\phi} = 300$  Ом. Погонная индуктивность фидера  $L_l = 2$  мкГн/м. Определить относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика, используемого в фидере. Чему равен коэффициент укорочения волны в таком фидере?

Решение:

1. Волновое сопротивление  $W_{\phi}$  двухпроводной воздушной ( $\varepsilon=1$ ) линии передачи равно

$$W_{\phi} = (276 / (\varepsilon)^{0.5}) \cdot \lg(d/r),$$

индуктивность двухпроводной линии передачи равна

$$L_l = 0.92 \cdot \lg d/r, \text{ мкГн/м.}$$

а коэффициент укорочения волны в фидере (кроме однопроводного) равен

$$\xi = \sqrt{\varepsilon}.$$

2. Отсюда находим коэффициент укорочения волны в фидере  $\xi$

$$\lg d/r = L_l / 0,92 = W_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon}}{276},$$

$$\xi = \sqrt{\varepsilon} = 276 L_1 / (0,92 W_\phi) = 276 \cdot 2 / (0,92 \cdot 300) = 2,$$

а затем и относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика

$$\varepsilon = \xi^2 = 4.$$

Ответ: коэффициент укорочения волны  $\xi = 2$ , а относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\varepsilon = 4$ . (зад. 4.2)

1.2.2 Определить параметры коаксиального медного фидера с полиэтиленовой ( $\varepsilon = 2,5$ ) изоляцией, размеры которого  $2r = 24$  мм,  $2a = 6$  мм. Длина рабочей волны  $\lambda = 30$  м.

Решение:

1. Определим погонную ёмкость  $C_l$ , пФ/м:

$$C_l = \frac{24,1\varepsilon}{\lg r/a} = \frac{24,1 \cdot 2,5\varepsilon}{\lg 12/3} = 100 \text{ пФ/м.}$$

2. Определим погонную индуктивность  $L_l$ , мкГн/м:

$$L_l = 0,46 \lg r/a = 0,46 \cdot \lg 12/3 = 0,277 \text{ мкГн/м.}$$

3. Определим погонное сопротивление  $R_l$ , Ом/м

$$R_l = \frac{0,72}{\sqrt{\lambda}} \cdot \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right) = \frac{0,72}{\sqrt{30}} \cdot \left( \frac{1}{12} + \frac{1}{3} \right) = 0,0547 \text{ Ом/м.}$$

4. Определим волновое сопротивление  $W_\phi$ :

$$W_\phi = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \lg r/a = \frac{138}{\sqrt{2,5}} \cdot \lg 12/3 = 52,6 \text{ Ом.}$$

Ответ: погонная ёмкость  $C_l = 100$  пФ/м, погонная индуктивность  $L_l = 0,277$  мкГн/м, погонное сопротивление  $R_l = 0,0547$  Ом/м, волновое сопротивление  $W_\phi = 52,6$  Ом.

1.2.3. Определить затухание в однопроводном медном фидере, покрытом слоем полиэтилена ( $\varepsilon = 2,3$ ) толщиной  $\delta = 5$  мм, при диаметре провода  $2r = 4$  мм и длине волны  $\lambda = 40$  см, если длина фидера  $l = 1$  км.

Решение:

1. Определим вспомогательную величину

$$\frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{r \cdot \delta \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)} = \frac{1}{400} \cdot \sqrt{2 \cdot 5 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2,3} \right)} = 0,0059.$$

Из графика на рисунке 1.1 находим отношение  $r / r_0 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ , откуда предельный радиус  $r_0 = r / 2 \cdot 10^{-2} = 2 / 0,02 = 100$  мм = 10 см.

2. Волновое сопротивление  $W_\phi$  провода, покрытого слоем полиэтилена

$$W_\phi = 138 \cdot \lg 0,68 \cdot r_0 / r = 138 \cdot \lg 0,68 \cdot 100 / 2 = 212 \text{ Ом.}$$

3. По формуле (1.1) определяем длину волны, распространяющейся вдоль фидера:

$$\lambda_{\phi} = \lambda / \sqrt{1 + \lambda/2 \cdot \pi \cdot r_0^2} = 40 / \sqrt{1 + 40/2 \cdot \pi \cdot 10^2} = 33,7 \text{ см.}$$

4. По формулам (1.2) и таблицы 1.1 рассчитываем коэффициент затухания фидера

$$\alpha \approx \frac{4,35 \cdot R_1}{W_{\phi}} = 4,35 \cdot \frac{0,72}{W_{\phi} \cdot r \cdot \sqrt{\lambda_{\phi}}} = \frac{4,35 \cdot 0,72}{212 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,337}} \approx 1,22 \cdot 10^{-2} \text{ дБ/м.}$$

5. Рассчитываем затухание в фидере длиной 1 км:

$$a \cdot l = 1,22 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3 = 12,2 \text{ дБ.}$$

Ответ: затухание в однопроводном медном фидере длиной 1 км равно 12,2 дБ.

1.2.4. Определить параметры четырехпроводного перекрещенного воздушного ( $\varepsilon = 1$ ) фидера, выполненного из медных проводов диаметром  $2r = 4$  мм. Расстояние между проводами  $d = 4$  см, рабочая длина волны  $\lambda = 100$  м.

Решение:

1. Определим погонную ёмкость  $C_l$ , пФ/м:

$$C_l = \frac{24,1 \cdot \varepsilon}{\lg 1,41d/r} = \frac{24,1 \cdot 1}{\lg 1,41 \cdot 40/2} = 16,6 \text{ пФ/м.}$$

2. Определим погонную индуктивность  $L_l$ , мкГн/м:

$$L_l = 0,46 \cdot \lg 1,41d/r = 0,46 \cdot \lg 1,41 \cdot 40/2 = 0,667 \text{ мкГн/м.}$$

3. Определим погонное сопротивление  $R_l$ , Ом/м

$$R_l = \frac{0,72}{r\sqrt{\lambda}} = \frac{0,72}{2\sqrt{100}} = 0,036 \text{ Ом/м.}$$

4. Определим волновое сопротивление  $W_{\phi}$ :

$$W_{\phi} = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \lg 1,41d/r = \frac{138}{\sqrt{1}} \cdot \lg 1,41 \cdot 40/2 = 200,1 \text{ Ом.}$$

Ответ: погонная ёмкость  $C_l = 16,6$  пФ/м, погонная индуктивность  $L_l = 0,667$  мкГн/м, погонное сопротивление  $R_l = 0,036$  Ом/м, волновое сопротивление  $W_{\phi} = 200,1$  Ом.

1.3. Задачи для самостоятельной работы

1.3.1. Определить параметры двухпроводного воздушного ( $\varepsilon = 1$ ) фидера, выполненного из медных проводов диаметром  $2r$  мм. Расстояние между проводами  $d$  см, рабочая частота  $f$  МГц. Вариант задания для этой задачи

назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 1.3 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 1.3

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$2r$ , мм	5	6	4	3	5,5	3	3,5	5,2	5	4,2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , см	15	20	25	30	28	22	16	24	18	26
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , МГц	10	12	16	15	14	10	12	16	15	14

1.3.2. Четырехпроводный перекрещенный медный фидер имеет данные: волновое сопротивление  $W_\phi$  Ом, погонная емкость  $C_l$  пФ/м. Предполагая, что потери в фидере отсутствуют, определить диаметр проводов фидера и относительную диэлектрическую проницаемость его диэлектрика, если расстояние между проводами фидера  $d$  см. Чему равен коэффициент укорочения волны в таком фидере? Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 1.4 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 1.4

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$W_\phi$ , Ом	100	110	120	130	140	120	130	120	100	110
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_l$ , пФ/м	45	50	55	60	41	48	65	75	70	65
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , см	1,8	2,0	2,2	1,7	2,4	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7

1.3.3. Коаксиальный медный фидер с твердым диэлектриком имеет данные: наружный диаметр диэлектрика  $2r$  мм, волновое сопротивление  $W_\phi$ , Ом, погонная емкость  $C_l$ , пФ/м. Предполагая, что потери в фидере отсутствуют, определить погонную индуктивность, диаметр внутреннего проводника и относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика, используемого в фидере. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 1.5 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 1.5

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$W_\phi$ , Ом	45	50	55	60	41	48	65	75	70	65
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_l$ , пФ/м	95	80	85	70	88	98	105	75	78	68
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$2r$ , мм	18	20	22	17	24	19	21	23	25	27

1.3.4. Определить волновое сопротивление, погонное активное сопротивление и коэффициент затухания однопроводного медного фидера, покрытого слоем диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  толщиной  $\delta$  см, при диаметре провода  $2r$ , мм и длине волны  $\lambda$  м. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 1.6 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 1.6

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\varepsilon$	2,45	2,5	2,8	3	3,5	3,4	3,5	3,75	3,7	3,65
$\delta$ , см	1,45	1,5	0,8	1,3	1,35	1,4	0,9	0,75	0,7	0,65
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda$ , м	1,4	0,9	0,75	0,7	0,65	1,45	1,5	0,8	1,3	1,35
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$2r$ , мм	1,8	2,0	2,2	1,7	2,4	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7

## 2 ТЕМА 2. ВОЛНОВОДНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ

2.1 Краткие сведения по расчету параметров волноводных линий передач

2.1.1 Расчет параметров прямоугольных волноводов

Для волны типа  $E$  в волноводах  $E_z \neq 0$ ,  $H_z = 0$ , а для волны типа  $H$ ,  $H_z \neq 0$ ,  $E_z = 0$ . Здесь  $E_z$  - это величина проекции напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  на продольную ось волновода  $z$ , совпадающую с направлением распространения энергии, а  $H_z$  - величина проекции напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  на ось  $z$ . Для волн типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  прямоугольных волноводов  $m$  и  $n$  - целые числа,  $m$  - число стоячих полуволн вдоль широкой стенки волновода  $a$ , а  $n$  - вдоль узкой стенки  $b$ .

Критическая (наибольшая) длина волны  $\lambda_{кр}$  для волновода с воздушным заполнением

$$\lambda_{кр} = 2 / \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}. \quad (2.1)$$

В этом разделе более подробно рассмотрим формулы для инженерного расчета параметров прямоугольных волноводных линии передач на основном типе волны  $H_{min}=H_{10}$ , имеющем наибольшую величину  $\lambda_{кр} = 2a$ .

Если же волновод заполнен диэлектриком, то критическая длина волны  $\lambda'_{кр}$  равна [3]:

$$\lambda'_{кр} = \lambda_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon$  и  $\mu$ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости диэлектрика.

Длина волны в волноводе  $\lambda_g$ , длина волны генератора  $\lambda_0$  и  $\lambda_{кр}$  для  $\mu \neq 1$  и  $\varepsilon \neq 1$  связаны соотношением

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \lambda_0 / \lambda_{кр}^2}}. \quad (2.3)$$

Запишем выражения для фазовой и для групповой скоростей для  $\mu \neq 1$  и  $\varepsilon \neq 1$ :

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2.4)$$

$$v_{гp} = c \sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \quad (2.5)$$

На любой рабочей частоте имеет место соотношение

$$v_\phi \cdot v_{гp} = c^2. \quad (2.6)$$

Для волновода с воздушным заполнением

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2.7)$$

$$v_{гp} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \quad (2.8)$$

Формулы для  $\lambda_g$ ,  $\lambda_0$  и  $\lambda_{кр}$  одинаковы для  $E$  и для  $H$ - волн.

Для волновода с воздушным заполнением критическая частота равна

$$f_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр}} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}. \quad (2.9)$$

Характеристическое сопротивление волновода это отношение поперечных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Для волновода с воздушным заполнением характеристические сопротивления для  $E$ - волн.

$$Z_{CE} = Z_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}, \quad (2.10)$$

а для  $H$ - волн

$$Z_{CH} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2.11)$$

где

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \approx 376,7 \text{ Ом}. \quad (2.12)$$

Для волновода с диэлектрическим заполнением характеристические сопротивления для  $E$ - волн

$$Z_{CE} = \left[ 376,7 \cdot \sqrt{1 - \lambda/\lambda'_{кр}{}^2} \right] \cdot \sqrt{\mu/\varepsilon}, \quad (2.13)$$

а для  $H$ - волн

$$Z_{CH} = \left[ 376,7 / \sqrt{1 - \lambda/\lambda'_{кр}{}^2} \right] \cdot \sqrt{\mu/\varepsilon}. \quad (2.14)$$

Мощность, переносимая по прямоугольному волноводу с воздушным заполнением волной типа  $H_{10}$  будет

$$P_{cp} = \frac{E_{max}^2 \cdot a \cdot b}{480 \cdot \pi} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2}. \quad (2.15)$$

Здесь  $E_{max}$  - амплитуда напряжённости электрического поля.

Наиболее широкополосным, в отсутствии паразитных типов волн, волновод, будет при  $b \leq 0,5a$  [4]. С другой стороны, при уменьшении  $b$  уменьшится предельная мощность  $P_{np}$ , передаваемая по волноводу. Поэтому в стандартных волноводах обычно  $b=0,5a$ , а в нестандартных при малой передаваемой мощности можно выбирать  $b \leq 0,5a$ .

Предельная мощность, переносимая бегущей волной типа  $H_{10}$  [3, 5, 6]:

$$P_{np} = \frac{ab \cdot E_{np}^2}{1.51} \cdot \sqrt{1 - \lambda/2a}{}^2, \quad (2.16)$$

где  $\lambda$ ,  $a$  и  $b$  в см,  $E_{np}$  – предельная пробивная прочность диэлектрика в кВ/см (для сухого воздуха  $E_{np} \approx 30$  кВ/см),  $P_{np}$  предельная пробивная мощность в кВт. Влияние температуры давления газов внутри волновода на предельную мощность  $P_{npH}$  [3, 6] описывается выражением

$$P_{npH} = 8.37 \cdot 10^{-6} \cdot P_{np} \cdot \left[ \frac{H}{t + 273} \right]^2, \quad (2.17)$$

где  $P_{np}$  предельная мощность при нормальном давлении  $H=101,3 \cdot 10^3$  Па и температуре  $t = 20$  °С.  $P_{npH}$  – эта же мощность при значениях  $t$  и  $H$  ( $H > 50 \cdot 10^3$  Па) отличных от нормальных.

Коэффициент запаса при определении рабочей мощности  $P_{раб}$  берут равным от 3 до 5 [6], так как при коэффициенте бегущей волны  $K$  меньше единицы предельная переносимая мощность уменьшится:

$$P'_{np} = P_{np} \cdot \left( \frac{1+K}{2} \right)^2, \quad (2.18)$$

$$P_{раб} = \frac{P_{np}}{3 \div 5}. \quad (2.19)$$

В радиотехнике погонные потери  $\Delta_{пог}$  измеряют в  $\partial B$  на единицу длины. Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением на волне основного типа  $H_{10}$  погонные потери  $\Delta_{пог}$  ( $\partial B/м$ ) равны [6]:

$$\Delta_{пог} = \frac{0,793 \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda_0}{2 \cdot a} \right)^2 \right]}{b \cdot \sqrt{\lambda_0 \cdot \sigma} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{2 \cdot a} \right)^2}}. \quad (2.20)$$

Здесь  $\sigma$  - удельная электропроводность внутренней поверхности волноводной трубы ( $См/м$ ).

В технике связи погонные потери  $\alpha_R$  измеряют в  $Нп$  на единицу длины. Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением коэффициент затухания  $\alpha_R$  ( $Нп/м$ ) для волн типа  $H_{10}$  и  $H_{20}$  равен:

$$\alpha_R = \left\{ \frac{\sqrt{\frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot \sigma}}}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Переход от  $\alpha_R$  к  $\Delta_{пог}$  осуществляют с помощью формулы

$$\Delta_{пог} = 8,868 \cdot \alpha_R. \quad (2.22)$$

Рабочий диапазон длин волн рассчитывается из условия использования волны  $H_{10}$  и равномерностей диэлектрических характеристик [3]:

$$\lambda_{\min} \div \lambda_{\max} = 1.1a \div 1.6a \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}. \quad (2.23)$$

Зависимость скорости распространения волн от частоты (дисперсия) вызывает искажения импульсов в волноводе. Большая часть энергии импульса длительностью  $\tau$  лежит в полосе частот от  $f_1$  до  $f_2$ :

$$f_1 = f_0 - \frac{1}{\tau}; \quad (2.24)$$

$$f_2 = f_0 + \frac{1}{\tau}. \quad (2.25)$$

При этом групповое время запаздывания  $\Delta t$  волн в волноводе на пути  $l$  можно оценить по формуле

$$\Delta t(l) = \frac{i}{v_{cp} f_1} - \frac{l}{v_{cp} f_2}. \quad (2.26)$$

### 2.1.2 Расчет параметров круглых волноводов

Для волн типа  $H_{mn}$  ( $H_z \neq 0$ ,  $E_z = 0$ ) в круглом волноводе с воздушным заполнением критическая длина волны находится из формулы [7]

$$\lambda_{kp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{Y_{mn}}, \quad (2.27)$$

где  $Y_{mn}$  - значение  $n$ -го корня функции Бесселя  $J_m(x)$ ,  $a$  - внутренний радиус волноводной трубы. Значения  $Y_{mn}$  приведены в таблице 2.1.

Для волн типа  $E_{mn}$  ( $E_z \neq 0$ ,  $H_z = 0$ ) в круглом волноводе [7] с воздушным заполнением

$$\lambda_{kp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\mu_{mn}}, \quad (2.28)$$

где  $\mu_{mn}$  - значение  $n$ -го корня производной от функции Бесселя  $J'_m x$ . Значения  $\mu_{mn}$  приведены в таблице 2.2. Основным типом волны  $E$  является волна  $E_{01}$ .

Таблица 2.1- Корни  $Y_{mn}$  функции Бесселя  $J_m x$

$n$	$m=0$	$m=1$	$m=2$
1	2,405	3,832	5,135
2	5,720	7,016	8,417
3	8,654	10,174	11,62

Таблица 2.2- Корни  $\mu_{mn}$  производной от функции Бесселя  $J'_m x$

$n$	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
1	3,832	1,841	3,052	4,201	5,318
2	7,016	5,335	6,705	8,016	9,283
3	10,174	8,536	9,965	-	-

Для основного типа  $H$  волны  $H_{11}$  с наибольшей критической длина волны  $\lambda_{kp} = 3,41 \cdot a$ , для ближайшего к основному типу волны  $E_{01}$  -  $\lambda_{kp} = 2,61 \cdot a$ , для  $H_{21}$  -  $\lambda_{kp} = 2,06 \cdot a$ , а для типов  $E_{11}$  и  $H_{01}$  -  $\lambda_{kp} = 1,64 \cdot a$  [3]. Длина волны в круглом волноводе  $\lambda_B$  находится по формуле (1.14),  $\lambda'_{kp}$  по формуле (1.13), характеристические сопротивления  $Z_{CE}$  по формуле (1.21), а  $Z_{CH}$  по формуле (1.22). Выражения для фазовой и для групповой скоростей для круглых и прямоугольных волноводов совпадают.

Предельная мощность, переносимая в круглом волноводе бегущей волной основного типа  $H$  волны  $H_{11}$  [3, 6]

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot E_{np}^2}{1.58} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{3,41 \cdot a} \right)^2}, \quad (2.29)$$

где  $a$ ,  $\lambda$  и  $\lambda_{кр}$  в см,  $E_{ПР}$  в кВ/см, а  $P_{ПР}$  в кВт. При коэффициенте бегущей волны  $K < 1$  предельная мощность уменьшится (1.28) и коэффициент запаса при определении рабочей мощности  $P_{раб}$  берут от 3 до 5 (2.29).

Для круглого волновода с воздушным заполнением при коэффициенте бегущей волны  $K \neq 1$  [2]

$$P_{np} = \frac{450 \cdot 2a^2 \cdot \lambda \cdot K}{\lambda_B}, \quad (2.30)$$

причем размерность единиц такая же, как и в формуле (2.39).

При  $\lambda = 0,8\lambda_{кр}$  отношение мощностей  $P_{np}$  к площади поперечного сечения  $S$  круглого волновода у волны  $H_{11}$  равно  $397 \text{ кВт/см}^2$ , у волны  $E_{01} = 505 \text{ кВт/см}^2$ , а у волны  $H_{01} = 401 \text{ кВт/см}^2$ . Поэтому при больших мощностях во вращающихся сочленениях используют волну  $E_{01}$ . Наименьшим же погонным затуханием ( $\partial Б/м$ ) обладает волна  $H_{01}$ . Погонные потери  $\Delta_{пог}$  ( $\partial Б/м$ ) на волне основного типа  $H_{11}$  для круглого волновода с воздушным заполнением [3, 6].

$$\Delta_{пог} = \frac{0.793}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \frac{\lambda}{3.41a}\right]^2}} \cdot \left[ \left( \frac{\lambda}{3.41a} \right)^2 + 0.418 \right], \quad (2.31)$$

где все линейные размеры измеряются в м, как и в формулах (1.42) и (1.42 а).

Погонные потери  $\Delta_{пог}$  ( $\partial Б/м$ ) на волне  $H_{01}$

$$\Delta_{пог} = \frac{0.793 \cdot \frac{\lambda}{1.64 \cdot a}}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \frac{\lambda}{1.64a}\right]^2}}, \quad (2.32)$$

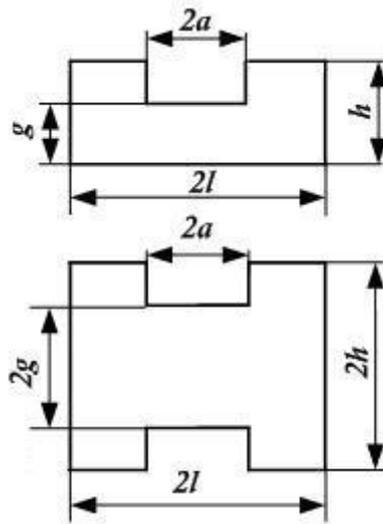
Она не возбуждает в стенках токов, текущих вдоль продольной координаты и её затухание неограниченно уменьшается по мере увеличения частоты эта волна используется в линиях передач для дальней волноводной связи [3, 6].

Погонные потери  $\Delta_{пог}$  ( $\partial Б/м$ ) на волне  $E_{01}$

$$\Delta_{пог} = \frac{0.793}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \frac{\lambda}{2.61a}\right]^2}} \quad ((2.33))$$

### 2.1.3 Расчет параметров П- и Н- волноводов

П- и Н- волноводы представляют собой прямоугольные волноводы с одним или двумя выступами и изображены на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 –  $P$  и  $H$  волноводы

При тех же габаритных размерах они имеют большую критическую волну основного типа  $H_{10}$  чем прямоугольные волноводы, в то время как критическая длина волны высшего типа  $H_{20}$  изменяется мало. Рабочий диапазон частот  $P$ - и  $H$ - волноводов, по этой причине, значительно шире чем у прямоугольных, а габариты меньше [3,7]. Если соотношение размеров  $P$ - и  $H$ - волноводов соответствует рисунку 1.1, то критические частоты у них одинаковы, волновое сопротивление и коэффициент затухания у  $H$ -волноводов вдвое меньше чем у  $P$ - волновода [6]. Коэффициент затухания  $P$ - и  $H$ - волноводов больше чем у прямоугольных волноводов.  $P$ - и  $H$ - волноводы имеют более плавную зависимость волнового сопротивления от частоты по сравнению с прямоугольными волноводами, что облегчает задачу широкополосного согласования. Меняя высоту гребней можно получить достаточно низкое волновое сопротивление равное волновому сопротивлению коаксиальных линий (50 или 75 Ом). Расчёты волнового сопротивления, коэффициента затухания и предельной мощности проводятся по громоздким формулам, приведённым в [3]. Нами они не рассматриваются. Целесообразно размеры  $P$ - и  $H$ - волноводов выбирать следующим образом [3]:

размер  $2l$  выбрать на 20% меньше самой короткой длины волны рабочего диапазона  $\lambda_{min}$  это обеспечивает минимальные габариты при условии, что волновод остается одноволновым

$$2l = 0,8 \cdot \lambda_{min} ; \quad (2.34)$$

минимальные потери и максимальная пропускаемая мощность при

$$a/l = 0,3 \div 0,4 ; \quad (2.35)$$

отношение  $g/h$  выбирают в зависимости от требуемого отношения  $\eta$  между критическими длинами волн типов  $H_{10}$  ( $\lambda_{kp10}$ ) и  $H_{20}$  ( $\lambda_{kp20}$ ) с помощью таблицы 2.3 [2],

$$\eta = \frac{\lambda_{kp10}}{\lambda_{kp20}} . \quad (2.36)$$

Таблица 2.3 – Значения отношения  $\eta$  при различных соотношениях размеров  $\Pi$  и  $H$  – волноводов.

$g/h$	0.1	0.15	0.2	0.3	0.35	0.4	0.5
$a/l=0.3$	6.3	5.25	4.4	3.7	3.5	3.2	2.8
$a/l=0.4$	5.6	4.8	4.1	3.6	3.4	3	2.6

#### 2.1.4 Расчет параметров полосковых волноводов

Полосковые волноводы нашли применение в печатных и интегральных схемах СВЧ. Наиболее широко используется несимметричная полосковая линия передачи, представляющая проводник ленточного сечения, нанесенный на диэлектрическую, ферритовую или полупроводниковую подложку на некотором расстоянии от металлической плоскости (рисунок 2.2). Другие типы линий передачи (симметричные, компланарные, щелевые) используется редко [4] и здесь не рассматривается.

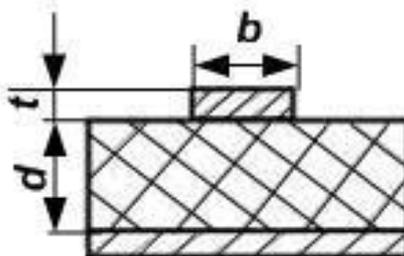


Рисунок 2.2 – Несимметричная полосковая линия передачи:  $b$ - ширина полоски;  $t$  - толщина полоски;  $d$ - толщина подложки с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 9$ .

Для расчета параметров несимметричной полосковой линии передач наиболее удобно пользоваться формулами, приведенными в [7].

Погонная ёмкость ( $\Phi/m$ ):

$$C_1 = 1.06 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + \frac{b}{d}\right) \quad (t/d \ll 1, b/d > 0.6), \quad (2.37)$$

$$C_1 = 1.06 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + \frac{b}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{t}{d}\right)^{-1} \quad (b/d < 2), \quad (2.38)$$

$$C_1 = 1.06 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + \frac{b}{d} \cdot \left(1 - \frac{t}{d}\right)^{-1}\right) \quad (b/d > 2). \quad (2.39)$$

Волновое сопротивление

$$Z_B = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{314}{1 + \frac{b}{d}} \quad (t/d \ll 1), \quad (2.40)$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{314}{1 + \frac{b}{d}} \cdot \left(1 - \frac{t}{d}\right) \quad (b/d < 2), \quad (2.41)$$

$$Z_B = 314 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \left[ 1 + \frac{b}{d} \cdot 1 - \frac{t}{d} \right]^{-1} \quad (b/d > 2). \quad (2.42)$$

Передаваемая мощность

$$P = 8.44 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot E_0^2 \cdot d^2 \cdot \ln \frac{r_B}{r_A}, \text{ Вт}, \quad (2.43)$$

где  $E_0$  – амплитуда напряженности в центре линии (В/м), а значения  $r_A$  и  $r_B$  берут из таблицы 2.4.

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов  $r_A$  и  $r_B$ .

b/d	t/d=0.025		t/d=0.06	
	$r_B$	$r_A$	$r_B$	$r_A$
1	5.1289	1.0365·10 <sup>-1</sup>	5.8905	1.3372·10 <sup>-1</sup>
2	7.6705	2.0195·10 <sup>-2</sup>	8.7697	2.2142·10 <sup>-2</sup>
3	10.0405	4.1461·10 <sup>-3</sup>	11.4578	4.5479·10 <sup>-3</sup>
4	12.3280	8.5969·10 <sup>-4</sup>	14.0536	9.4308·10 <sup>-4</sup>
5	14.5661	1.7862·10 <sup>-4</sup>	16.5938	1.9595·10 <sup>-4</sup>
6	16.7708	3.7127·10 <sup>-5</sup>	19.0964	4.0729·10 <sup>-5</sup>
7	18.9514	7.7177·10 <sup>-6</sup>	21.5717	8.4565·10 <sup>-6</sup>
8	21.1137	1.6043·10 <sup>-6</sup>	24.0265	1.7600·10 <sup>-6</sup>
9	23.2617	3.3351·10 <sup>-7</sup>	26.4651	3.8586·10 <sup>-7</sup>
10	25.3981	6.9329·10 <sup>-8</sup>	28.8905	7.6056·10 <sup>-8</sup>

Предельная мощность ограничивается максимально допустимой напряженностью электрического поля вблизи проводника, так как поле внутри линии неравномерно

$$E_{MAX} = \frac{2E_0}{K_H}, \quad (2.44)$$

где  $K_H$  – коэффициент, учитывающий эту неравномерность

$$K_H \approx 2 \cdot \sqrt{2t/d} + 4 \cdot \frac{t}{d}, \quad (2.45)$$

Предельная мощность  $P_{np}$  при учете неравномерности распределения поля и  $E_0$  равно пробивному напряжению

$$P_{np} = P \cdot \frac{K_H^2}{4}. \quad (2.46)$$

Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в проводящих пластинах

$$\alpha_M = \frac{R_s}{120 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \left| \frac{\ln \left( \frac{r_A \cdot K_H}{2} \right)}{\ln \left( \frac{r_B}{r_A} \right)} \right| \text{ Нн/м}, \quad (2.47)$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление металла:

$$R_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \mu_0}{2 \cdot \sigma}} . \quad (2.48)$$

Коэффициент ослабления обусловленный потерями в диэлектрике  $\alpha_\delta$  при  $\mu \neq 1$  можно посчитать по формуле

$$\alpha_\delta = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a} \cdot (\operatorname{tg} \delta_\varepsilon + \operatorname{tg} \delta_\mu) . \quad (2.49)$$

При  $\mu \neq 1$  выражение для длины волны в полосковом волноводе имеет вид

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}} \cdot \mu_{\text{эфф}}}} , \quad (2.50)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны генератора.

При  $\mu=1$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}} . \quad (2.51)$$

Здесь:  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость, а  $\mu_{\text{эфф}}$  – эффективная магнитная проницаемость а в полосковом волноводе

Из (1.61) находим эффективную диэлектрическую проницаемость в полосковом волноводе  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  при  $\mu=1$ :

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 . \quad (2.52)$$

Постоянная времени отрезка полоскового волновода длиной  $l$  находится из выражения

$$\tau = \frac{l}{v_\phi} = Z_g \cdot C_1 \cdot l , \quad (2.53)$$

а фазовая скорость находится из выражений

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (2.54)$$

и

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}} , \quad (2.55)$$

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

Сопоставляя (1.63) и (1.65) вычислим величину волнового сопротивления полоскового волновода

$$Z_g = \frac{1}{v_\phi \cdot C_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}}{c \cdot C_1} . \quad (2.56)$$

Величина волнового сопротивления находится также из выражения

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (2.57)$$

Величина амплитуды  $I_m$  электрического тока на проводящей полоске находится из выражения:

$$I_m = \frac{U_m}{Z_{\epsilon}}, \quad (2.58)$$

где  $U_m$  - амплитуда гармонического напряжения.

Величина амплитуды вектора плотности поверхностного электрического тока на полоске  $J_{\text{поверх}}$  находится из выражения:

$$J_{\text{поверх}} = \frac{I_m}{b}. \quad (2.59)$$

Волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи иногда рассчитывают по уточненным по сравнению с формулами (1.50) - (1.52) формулам (1.70):

$$Z_{\epsilon} = \begin{cases} \frac{120 \cdot \pi / \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}{b/d + 1.393 + 0.667 \cdot \ln b/d + 1.444}, & \frac{b}{d} \geq 1 \\ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \cdot \ln \left( 8 \cdot \frac{d}{b} + \frac{b}{4 \cdot d} \right), & \frac{b}{d} \leq 1. \end{cases} \quad (2.60)$$

В формулах (1.70) эффективная диэлектрическая проницаемости  $\epsilon_{\text{эф}}$  определяется из выражения

$$\epsilon_{\text{эф}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon + 1 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon - 1 \cdot p, \quad (2.61)$$

где

$$p = \begin{cases} \left( 1 + 12 \cdot \frac{d}{b} \right)^{-1/2}, & \frac{b}{d} \geq 1 \\ \left( 1 + 12 \cdot \frac{d}{b} \right)^{-1/2} + 0.04 \cdot \left( 1 - \frac{b}{d} \right)^2, & \frac{b}{d} \leq 1 \end{cases}. \quad (2.62)$$

При  $b/d > 1$  значение эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{эф}}$  можно также определять по формуле

$$\epsilon_{\text{эф}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon + 1 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon - 1 \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{d}{b} \right)^{-1/2}. \quad (2.63)$$

## 2.2 Примеры решения типовых задач по расчету волноводов

### 2.2.1 Примеры решения задач по расчету параметров прямоугольных волноводов

2.2.1.1 В прямоугольном волноводе сечением  $4 \times 3 \text{ см}^2$  распространяется волна типа  $H_{11}$ . Волновод заполнен диэлектриком с  $\varepsilon = 1,15$ . Частота колебаний  $8 \text{ ГГц}$ . Определить фазовую и групповую скорости и длину волны в волноводе.

Решение.

Для того, чтобы найти длину волны и фазовую скорость в прямоугольном волноводе, необходимо определить значения критической длины волны ( $\lambda_{кр}$ ) для волны  $H_{mn}$  типа  $H_{11}$

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2}} = 4,8 \text{ см}$$

и длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^9} = 0,0375 \text{ м} = 3,75 \text{ см}.$$

Вычисляем длину волны в прямоугольном волноводе, заполненном диэлектриком с  $\varepsilon = 1,15$ .

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \lambda_0 / \lambda_{кр}^2}} = \frac{3,75}{\sqrt{1,15 \cdot 1 - 3,75 / 4,8^2}} = 5,102 \text{ см}.$$

Затем определим фазовую скорость волны в этом волноводе

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{1,15 \cdot 1 - \left(\frac{3,75}{4,8}\right)^2}} = 4,082 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Вычислим групповую скорость волны. Получим

$$v_{gp} = c^2 / v_\phi \cdot \varepsilon \cdot \mu = \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{4,082 \cdot 10^8 \cdot 1,15 \cdot 1} = 1,917 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $v_\phi = 4,082 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ,  $v_{gp} = 1,917 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ,  $\lambda_g = 5,102 \text{ см}$ .

2.2.1.2 Прямоугольный волновод сечением  $23 \times 10 \text{ мм}^2$  служит для передачи СВЧ импульсов  $t = 6 \text{ нс}$ , несущая частота  $f_0 = 10 \text{ ГГц}$ . Длина линии  $50 \text{ м}$ . Оценить качественно величину искажения импульсов, вызванных дисперсией волновода [7].

Указание. Частотная зависимость модуля спектральной плотности прямоугольного СВЧ импульса представлена на рисунке 2.3.

Решение.

Определим значение критической длины волны ( $\lambda_{кр}$ ) и критической частоты ( $f_{кр}$ ) для волны основного типа  $H_{10}$ :

$$\lambda_{кр} = 2 \cdot a = 2 \cdot 2,3 = 4,6 \text{ см};$$

$$f_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,046} = 6,52 \cdot 10^9 = 6,52 \text{ ГГц}.$$

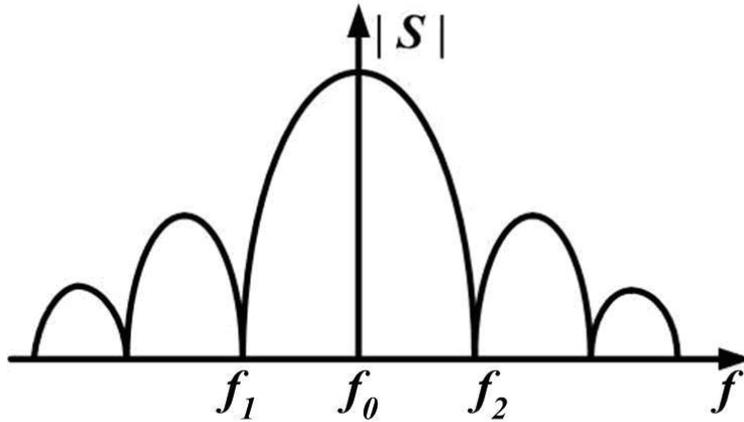


Рисунок 2.3 – Частотная зависимость модуля спектральной плотности прямоугольного СВЧ импульса

В диапазоне частот от  $f_1$  до  $f_2$  (рисунок 2.3) передается большая часть мощности СВЧ импульсов. Вычислим значения частот  $f_1$  и  $f_2$ :

$$f_1 = f_0 - \frac{1}{\tau} = 10^{10} - \frac{1}{6 \cdot 10^{-9}} = 9,83 \cdot 10^9 = 9,83 \text{ ГГц};$$

$$f_2 = f_0 + \frac{1}{\tau} = 10^{10} + \frac{1}{6 \cdot 10^{-9}} = 10,167 \cdot 10^9 = 10,167 \text{ ГГц}.$$

Групповое время запаздывания  $\Delta t$  волн в волноводе на пути  $l$  можно оценить по формуле

$$\Delta t(l) = \frac{l}{v_{гр} f_1} - \frac{l}{v_{гр} f_2}.$$

При подстановке в эту формулу выражений (1.19) для определения групповой скорости волны на частотах  $f_1$  и  $f_2$

$$v_{гр} f_1 = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{01}}{\lambda_{кр}}\right)^2} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_1}\right)^2} \quad \text{и}$$

$$v_{гр} f_2 = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{02}}{\lambda_{кр}}\right)^2} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_2}\right)^2} \quad \text{получим}$$

$$\Delta t(l) = \frac{i}{c} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_1}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_2}\right)^2}} \right] = \frac{50}{3 \cdot 10^8} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{6,52}{9,83}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{6,52}{10,167}\right)^2}} \right] =$$

$$= 5,8 \cdot 10^{-9} c = 5,8 \text{ нс.}$$

Ответ:  $\Delta t(l=50\text{м}) = 5,8 \cdot 10^{-9} c = 5,8 \text{ нс.}$

2.2.1.3 Вычислить размеры поперечного сечения квадратного волновода с воздушным заполнением, если известно, что фазовая скорость волны типа  $E_{11}$  равна  $6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Частота передаваемых колебаний  $5 \text{ ГГц}$ .

Решение.

Запишем выражение для критической длины волны  $\lambda_{кр}$ :

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

Подставив в это выражение исходные данные задачи ( $m=1$ ,  $n=1$ ,  $a=b$ ) получим  $\lambda_{кр} = a \cdot \sqrt{2}$ .

Запишем выражение для фазовой скорости для исходных данных задачи

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{a \cdot \sqrt{2}}\right)^2}}.$$

Из последнего выражения находим формулу для расчёта численного значения  $a$  и вычисляем это значение:

$$\left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{2} \cdot a}\right)^2; \quad \left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2 \cdot 2 \cdot a^2 - 2 \cdot a^2 = -\lambda_0^2,$$

$$\text{где } \lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9} = 0,06 \text{ м} = 6 \text{ см};$$

$$a = \lambda_0 \sqrt{\frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2\right]}} = 0,06 \sqrt{\frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^8}\right)^2\right]}} = 0,049 \text{ м} = 49 \text{ мм.}$$

Ответ:  $49 \times 49 \text{ мм.}$

2.2.1.4 Фазовая скорость волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе равна  $5c$ , где  $c$  - скорость света. Определить размеры волновода, если длина волны в свободном пространстве равна  $10 \text{ см}$ .

Решение.

Запишем выражение для критической длины волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе для исходных данных задачи ( $m=1, n=0$ ):

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a.$$

Запишем выражение для фазовой скорости для исходных данных задачи

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2}}.$$

Из последнего выражения находим формулу для расчёта численного значения  $a$  и вычисляем это значение:

$$\left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2, \quad \left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2 \cdot 4 \cdot a^2 - 4 \cdot a^2 = -\lambda_0^2$$

$$a = \lambda_0 \sqrt{\frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{c}{v_{\phi}}\right)^2\right]}} = 0,1 \sqrt{\frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{c}{5 \cdot c}\right)^2\right]}} = 0,051 \text{ м} = 5,1 \text{ см}.$$

Ответ:  $a = 5.1 \text{ см}$ ; размер  $b$  из условий задачи определить нельзя.

2.2.1.5 В волноводе заполненном диэлектриком с относительной проницаемостью  $\varepsilon = 2.25$ , распространяется волна с фазовой скоростью  $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Определить групповую скорость.

Решение.

На любой рабочей частоте имеет место соотношение

$$v_{\phi} \cdot v_{gp} = c^2 / \varepsilon \cdot \mu .$$

Откуда получим

$$v_{gp} = c^2 / v_{\phi} \cdot \varepsilon \cdot \mu = \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{3 \cdot 10^8 \cdot 2,25 \cdot 1} = 1,333 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $1,333 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  .

2.2.1.6 Определить характеристическое сопротивление волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $72 \times 34$  мм при частоте колебаний  $3$  ГГц.

Решение.

Вычислим значение величины критической длины волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе для исходных данных задачи ( $m=1, n=0$ ):

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a = 2 \cdot 72 = 144 \text{ мм} = 14,4 \text{ см.}$$

Вычислим значение величины длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см.}$$

Вычислим характеристическое сопротивление волны типа  $H_{10}$

$$Z_{CH} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{376,7}{\sqrt{1 - \left(\frac{10}{14,4}\right)^2}} = 523,6 \text{ Ом.}$$

Ответ:  $Z_{CH} = 523,6 \text{ Ом.}$

2.2.1.7 Определить затухание волны типа  $H_{10}$  в отрезке прямоугольного волновода сечением  $23 \times 10$  мм, длиной  $10$  см на частоте  $6$  ГГц.

Решение.

Вычислим значения величин длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}$$

и коэффициента

$$\beta = 2\pi / \lambda_0 = 6,28 / 5 = 1,256 \text{ см}^{-1}.$$

Вычислим поперечное волновое число для исходных данных задачи ( $m=1, n=0$ )

$$g = \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1 \cdot \pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{b}\right)^2} = \frac{\pi}{a} = \frac{3,14}{2,3} = 1,365 \text{ см}^{-1}$$

и продольное волновое число

$$h = \sqrt{\beta^2 - g^2} = h' + jh'' = \sqrt{1,256^2 - 1,365^2} = \sqrt{-0,285} = j0,534 \text{ см}^{-1}.$$

Так как для исходных данных задачи продольное волновое число мнимое, то волновод является запердельным, то есть обладает огромными погонными потерями.

$$h'' = 0,534 \text{ см}^{-1} = 0,534 \text{ Нн/см.}$$

Погонные потери  $h''$  измеряют в  $\text{Нн}$  на единицу длины в технике связи, а в радиотехнике погонные потери  $\Delta_{\text{ПОГ}}$  измеряют в  $\text{дБ}$  на единицу длины. Переход от  $h''$  к  $\Delta_{\text{ПОГ}}$  осуществляют с помощью формулы

$$\Delta_{\text{ПОГ}} = 8,868 \cdot h'' = 8,868 \cdot 0,534 = 4,74 \text{ дБ/см.}$$

Вычислим потери при длине волновода  $l = 10 \text{ см}$  с помощью формулы

$$\Delta = \Delta_{\text{ПОГ}} \cdot l = 4,74 \cdot 10 = 47,4 \text{ дБ.}$$

Ответ:  $\Delta = 47,4 \text{ дБ.}$

2.2.1.8 Определить погонное затухание волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $72 \times 34 \text{ мм}$  при частоте поля  $3 \text{ ГГц}$ . Материал стенок волновода – медь ( $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ).

Решение.

Вычислим значения величин длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}$$

и круговой частоты

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 6,28 \cdot 3 \cdot 10^9 = 18,84 \cdot 10^9 \text{ рад/с.}$$

В литературе имеются две разные формулы, позволяющие вычислить погонное затухание в прямоугольном волноводе. Наиболее простая для вычислений формула справедлива только для волны типа  $H_{10}$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{ПОГ}} &= \frac{0,793 \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda_0}{2 \cdot a} \right)^2 \right]}{b \cdot \sqrt{\lambda_0 \cdot \sigma} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{2 \cdot a} \right)^2}} = \\ &= \frac{0,793 \left[ 1 + \frac{2 \cdot 34}{72} \cdot \left( \frac{10}{2 \cdot 7,2} \right)^2 \right]}{0,034 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 5,7 \cdot 10^7} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{10}{2 \cdot 7,2} \right)^2}} = 0,02 \text{ дБ/м} \end{aligned}$$

Более универсальная формула, справедливая как для волны типа  $H_{10}$ , так для волны типа  $H_{20}$ , позволяет вначале вычислить коэффициент затухания, а затем и погонное затухание  $\Delta_{\text{ПОГ}}$ . Учтём, что для нашего случая (волны типа  $H_{10}$ )

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a = 2 \cdot 7,2 = 14,4 \text{ см.}$$

Вычислим коэффициент затухания  $\alpha_R$ .

$$\alpha_R = \left\{ \frac{\sqrt{\frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot \sigma}}}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2 \right] =$$

$$= \left\{ \frac{\sqrt{\frac{18,84 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 5,7 \cdot 10^7}}}{\left[ 34 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{10}{14,4}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot 34}{72} \cdot \left(\frac{10}{14,4}\right)^2 \right] = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ Нн/м.}$$

Вычислим погонное затухание в прямоугольном волноводе

$$\Delta_{Пог} = 8,868 \cdot \alpha_R = 8,868 \cdot 2,27 \cdot 10^{-3} = 0,02 \text{ дБ/м.}$$

Ответ:  $\Delta_{Пог} = 0,02 \text{ дБ/м.}$

2.2.1.9 Определить размеры поперечного сечения прямоугольного волновода, работающего на волне типа  $H_{10}$ , при которых обеспечивается минимальное затухание при условии невозможности распространения высших типов волн. Частота колебаний  $6 \text{ ГГц}$ . Найти значение минимального погонного затухания при удельной проводимости материала стенок волновода  $5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ .

Решение.

Вычислим значения величины длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}$$

и критических длин волн прямоугольного волновода для основного типа  $H_{10}$  ( $m=1, n=0$ ) и типа  $H_{20}$  ( $m=2, n=0$ ), ближайшего к основному типу по величине критической длины волны.

$$\lambda_{кр} \left( H_{10} \right) = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a,$$

$$\lambda_{кр} \left( H_{20} \right) = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = a.$$

Проанализируем формулу для вычисления коэффициента затухания  $\alpha_R$

$$\alpha_R = \left\{ \frac{\sqrt{\frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot \sigma}}}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2 \right].$$

Коэффициент затухания  $\alpha_R$  имеет минимальное значение  $\alpha_{R \min}$  при минимальном значении

$$\min \left\{ \frac{1}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2 \right],$$

которое достигается при минимальном значении  $\lambda_0 = \lambda_{кр} (H_{20}) = a$  при  $b \leq a/2$

$$\min \left\{ \frac{1}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{2 \cdot a}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot a}\right)^2 \right] = \min \left\{ \frac{2a+b}{b \cdot \sqrt{3}} \right\} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2 \cdot a}\right).$$

Потери минимальны при  $b = b_{max} = a/2 = 2,5$  см. Значения  $b > a/2$  рассматривать не следует, так как при  $b > a/2$  максимальная длина волны для некоторых паразитных типов волн больше чем  $\lambda_{кр} (H_{20}) = a$ . Например, для волн типов  $H_{11}$  и  $E_{11}$  при  $b = a$  значения величины критической длины волны

$$\lambda_{кр} \left( H_{11} \right) = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2}} = a\sqrt{2}.$$

Вычислим коэффициент затухания  $\alpha_R$  при  $\lambda_0 = \lambda_{кр} (H_{20}) = a = 5$  см и  $b = a/2 = 2,5$  см.

$$\alpha_R = \left\{ \frac{\sqrt{\frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot \sigma}}}{\left[ b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2 \right] =$$

$$= \frac{\left\{ \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 5,7 \cdot 10^7}}}{\left[ 0,025 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} \right]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{2}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \right]}{\left[ 0,025 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} \right]} = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ Hn/м.}$$

Вычислим минимальное погонное затухание в прямоугольном волноводе при  $\lambda_0 = \lambda_{кр} (H_{20}) = a = 5 \text{ см}$  и  $b = a/2 = 2,5 \text{ см}$ .

$$\Delta_{\text{ПОР}} = 8,868 \cdot \alpha_R = 8,868 \cdot 3,12 \cdot 10^{-3} = 0,02712 \text{ дБ/м.}$$

Ответ:  $\Delta_{\text{ПОР}} = 0,02712 \text{ дБ/м}$  при  $\lambda_0 = \lambda_{кр} (H_{20}) = a = 5 \text{ см}$  и  $b = a/2 = 2,5 \text{ см}$ .

2.2.1.10 Определить предельную мощность ( $P_{np}$  в  $\text{кВт}$ ), переносимую бегущей волной типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $a \times b = 2,3 \times 1,0 \text{ см}$  с воздушным заполнением:

при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

при давлении  $H = 50 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить предельную мощность, переносимую волной типа  $H_{10}$  в этом же волноводе, при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и при коэффициенте бегущей волны  $K = 0,5$ . Выбрать рабочую мощность  $P_{раб}$ . Частота колебаний  $10 \text{ ГГц}$ . Предельная пробивная прочность для сухого воздуха при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $E_{np} \approx 30 \text{ кВ/см}$ .

Решение.

1. Вычислим значения величины длины волны генератора

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0,03 \text{ м} = 3 \text{ см}$$

2. Вычислим предельную мощность ( $P_{np}$  в  $\text{кВт}$ ), переносимую бегущей волной типа  $H_{10}$  при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  по формуле (1.27), где  $\lambda$ ,  $a$  и  $b$  в  $\text{см}$ , а  $E_{np}$  в  $\text{кВ/см}$ :

$$P_{np} = \frac{ab \cdot E_{np}^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = \frac{2,3 \cdot 1 \cdot 30^2}{1,51} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{3}{2 \cdot 2,3}\right)^2} = 1039 \text{ кВт}.$$

3. Вычислим предельную мощность ( $P_{npH}$  в  $\text{кВт}$ ), переносимую бегущей волной типа  $H_{10}$  при нормальном давлении  $H = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$P_{npH} = 8,37 \cdot 10^{-6} \cdot P_{np} \cdot \left[ \frac{H}{t + 273} \right]^2 = 8,37 \cdot 10^{-6} \cdot 1039 \cdot \left[ \frac{101,3 \cdot 10^3}{60 + 273} \right]^2 = 804,8 \text{ кВт}.$$

4. Вычислим предельную мощность ( $P_{npH}$  в  $\text{кВт}$ ), переносимую бегущей волной типа  $H_{10}$  при давлении  $H = 50 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$P_{npH} = 8,37 \cdot 10^{-6} \cdot P_{np} \cdot \left[ \frac{H}{t + 273} \right]^2 = 8,37 \cdot 10^{-6} \cdot 1039 \left[ \frac{50 \cdot 10^3}{20 + 273} \right]^2 = 253 \text{ кВт} .$$

5. Вычислим предельную мощность ( $P'_{np}$  в кВт), переносимую волной типа  $H_{10}$ , при нормальном давлении  $H=101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и при коэффициенте бегущей волны  $K=0,5$ :

$$P'_{np} = P_{np} \cdot \left( \frac{1+K}{2} \right)^2 = 1039 \cdot \left( \frac{1+0,5}{2} \right)^2 = 584,4 \text{ кВт} .$$

6. Рабочую мощность  $P_{раб}$  выбираем с коэффициентом запаса от 3 до 5:

$$P_{раб} = \frac{P_{np}}{3...5} = \frac{1039}{3...5} = (346,3...207,8) \text{ кВт} .$$

Ответ.

Предельная мощность  $P_{np}$ :

при  $H=101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ,  $K=1$  и  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $P_{np} = 1039 \text{ кВт}$ ;

при  $H=101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ,  $K=1$  и  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $P_{np} = 804,8 \text{ кВт}$ ;

при  $H= 50 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ,  $K=1$  и  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $P_{np} = 253 \text{ кВт}$ ;

при  $H=101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ,  $K=0,5$  и  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $P_{np} = 584,4 \text{ кВт}$ .

Рабочую мощность  $P_{раб}$  выбираем в диапазоне от 207,8 до 346,3 кВт.

## 2.2.2 Примеры решения задач по расчету параметров круглых волноводов

2.2.2.1 Какие типы волн могут распространяться в круглом волноводе диаметром 3 см, заполненном диэлектриком с относительной проницаемостью  $\varepsilon = 3.2$  на частоте 10 ГГц.

Решение.

В круглом волноводе, заполненном диэлектриком, могут распространяться только те типы волн, для которых длина волны в диэлектрике  $\lambda_0$  меньше критической длины волны  $\lambda_{кр}$  ( $\lambda_0 < \lambda_{кр}$ ).

Вычислим длину волны в диэлектрике

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{10} \cdot \sqrt{3,2}} = 0,01677 \text{ м} = 1,677 \text{ см} .$$

Для волн типа  $E_{mn}$  критическая длины волны  $\lambda_{кр} (E_{mn})$  равна

$$\lambda_{кр} (E_{mn}) = \frac{2\pi \cdot a}{Y_{mn}} ,$$

где  $Y_{mn}$  - корни функции Бесселя, а для волн типа  $H_{mn}$  критическая длины волны  $\lambda_{кр} (H_{mn})$  равна

$$\lambda_{кр} (H_{mn}) = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{mn}},$$

где  $\mu_{mn}$  - корни первой производной от функции Бесселя  $J_m$ . Из формул для  $\lambda_{кр}$  и из неравенства  $\lambda_0 < \lambda_{кр}$  получаем условия существования для волн типа  $E_{mn}$

$$Y_{mn} < \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_0} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5}{1,677} = 5,617,$$

а для волн типа  $H_{mn}$

$$\mu_{mn} < \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_0} = 5,617.$$

Здесь  $a = 1,5$  см – радиус сечения круглого волновода.

Для решения задачи используем численные значения корней  $Y_{mn}$  и  $\mu_{mn}$  из справочных таблиц 2.1 и 2.2. Сопоставляя условия существования волн типа  $E_{mn}$  для заданных условий ( $Y_{mn} < 5,617$ ) и данные таблицы 2.1, находим типы  $E$ -волн, которые могут распространяться в круглом волноводе:  $E_{01}$ ,  $E_{11}$ , и  $E_{21}$ . Затем сопоставим условия существования волн типа  $H_{mn}$  для заданных условий ( $\mu_{mn} < 5,617$ ) и данные таблицы 2.2, находим типы  $H$ -волн, которые могут распространяться в круглом волноводе:  $H_{01}$ ,  $H_{11}$ ,  $H_{21}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{31}$  и  $H_{41}$ .

Ответ:  $Y_{mn} < \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_0} = 5,617$ , ( могут распространяться  $E$ -волны:  $E_{01}$ ,  $E_{11}$ , и  $E_{21}$ ) и  $\mu_{mn} < \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_0} = 5,617$  ( могут распространяться  $H$ -волны:  $H_{01}$ ,  $H_{11}$ ,  $H_{21}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{31}$  и  $H_{41}$ ).

2.2.2.2 Диаметр волновода, в котором распространяется на частоте 12 ГГц волна типа  $H_{11}$ , равен 6 см. Определить критическую длину волны, длину волны в волноводе и характеристическое сопротивление.

Решение.

Определим критическую длину волны типа  $H_{mn} = H_{11}$

$$\lambda_{кр} (H_{mn}) = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{mn}}.$$

Для волны основного типа колебаний  $H_{11}$  имеем  $\mu_{mn} = 1,841$  (таблица 2.2). Тогда

$$\lambda_{кр} H_{11} = \frac{2\pi \cdot a}{1,841} = 3,41 \cdot a = 3,41 \cdot 3 = 10,23 \text{ см.}$$

Определим длину волны генератора  $\lambda_0$  и длину волны в волноводе  $\lambda_g$ :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9} = 0,025 \text{ м} = 2,5 \text{ см.}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \lambda_0 / \lambda_{кр}^2}} = \frac{2,5}{\sqrt{1 \cdot 1 - 2,5 / 10,23^2}} = 2,58 \text{ см.}$$

Определим характеристическое сопротивление  $Z_c$

$$Z_{сн} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{376,7}{\sqrt{1 - \left(\frac{2,5}{10,23}\right)^2}} = 388,5 \text{ Ом.}$$

Ответ:  $\lambda_{кр} = 10,23 \text{ см}$ ,  $\lambda_g = 2,58 \text{ см}$ ,  $Z_c = 388,5 \text{ Ом}$ .

2.2.2.3 При каком диаметре круглого волновода в нем может распространяться только один основной тип волны при частоте колебаний  $10 \text{ ГГц}$ .

Решение.

Определим длину волны генератора  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0,03 \text{ м} = 3 \text{ см.}$$

Определим критическую длину волны  $\lambda_{кр}$  ( $H_{mn}$ ) для волны основного типа колебаний  $H_{11}$  ( $H_{mn} = H_{11}$ ), обладающего наибольшей  $\lambda_{кр}$  и наименьшим значением корня  $\mu_{mn} = 1.841$ .

$$\lambda_{кр} (H_{mn}) = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{mn}} \text{ и}$$

$$\lambda_{кр} (H_{11}) = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{11}} = \frac{2\pi \cdot a}{1.841} = 3.41 \cdot a.$$

Наиболее близкими к основному типу колебаний  $H_{11}$  значениями  $\lambda_{кр}$  и корня  $Y_{mn} = 2,405$  обладает волна типа  $E_{01}$ , для которой

$$\lambda_{кр} (E_{mn}) = \lambda_{кр} (E_{01}) = \frac{2\pi \cdot a}{Y_{01}} = \frac{2\pi \cdot a}{2,405} = 2,61 \cdot a.$$

Запишем условие, при котором в круглом волноводе может распространяться только один основной тип колебаний

$$\lambda_{кр} (E_{01}) < (\lambda_0 = 3 \text{ см}) < \lambda_{кр} (H_{11}).$$

Вычислим из выражения для  $\lambda_{кр} (H_{11})$  значение величины минимального диаметра круглого волновода, равное  $2 a_{\min} (H_{11})$ , при достижении кото-

рого прекращает распространяться основной тип волны при длине волны генератора  $\lambda_0 = 3 \text{ см}$

$$a_{\min}(H_{11}) = \lambda_0 / 3,41 = 3 / 3,41 = 0,8797 \text{ см} \quad \text{и} \quad 2 a_{\min}(H_{11}) = 1,759 \text{ см.}$$

Вычислим из выражения для  $\lambda_{\text{кр}}(E_{01})$  значение величины максимального диаметра круглого волновода, равное  $2 a_{\max}(E_{01})$ , при превышении которого наряду с основным типом волны при длине волны генератора  $\lambda_0 = 3 \text{ см}$  начинает распространяться ближайший по длине волны к основному типу паразитный тип колебаний  $E_{01}$

$$a_{\max}(E_{01}) = \lambda_0 / 2,61 = 3 / 2,61 = 1,145 \text{ см} \quad \text{и} \quad 2 a_{\max}(E_{01}) = 2,29 \text{ см.}$$

Ответ:  $1,759 \text{ см} < 2a < 2,29 \text{ см}$ .

2.2.2.4 В круглом волноводе диаметром  $5 \text{ см}$  распространяется волна  $E_{01}$ . Передаваемая мощность  $20 \text{ кВт}$ . Определить максимальные значения напряженности электрического поля и амплитуду поверхностной плотности тока на стенках волновода. Длина волны генератора  $\lambda_0 = 5 \text{ см}$ .

Справочные данные из таблицы функций Бесселя:  $J_0 x=0 = 1, Y_{01} = 2,405, J_1 \cdot Y_{01} = J_1 \cdot 2,405 = 0,52, J_1 x=1,8411 = 0,5819$ .

Решение.

Запишем выражения для компонент напряжённости полей волны типа  $E_{01}$  (при  $m=0$  и  $n=1$ ) [7]:

$$E_z = E_0 \cdot J_0 \left( \frac{Y_{mn} \cdot r}{a} \right) \cdot \cos(m \cdot \varphi) = E_0 \cdot J_0 \left( \frac{Y_{01} \cdot r}{a} \right),$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_r &= -j \cdot h \cdot E_0 \cdot \left[ \frac{m \cdot a^2}{Y_{mn}^2 \cdot r} \cdot J_m \left( \frac{Y_{mn}}{a} \right) - \frac{a}{Y_{mn}} \cdot J_{m+1} \left( \frac{Y_{mn} \cdot r}{a} \right) \right] \cdot \cos m \cdot \varphi \cdot e^{-j \cdot h \cdot z} = \\ &= j \cdot h \cdot E_0 \cdot \left[ \frac{a}{Y_{01}} \cdot J_1 \left( \frac{Y_{01} \cdot r}{a} \right) \right] \cdot e^{-j \cdot h \cdot z}, \quad \vec{E}_\varphi = 0. \end{aligned}$$

$$\vec{H}_r = 0, \quad \vec{H}_\varphi = \frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{h} \cdot \dot{E}_r, \quad \vec{H}_z = 0.$$

Максимальное значение функции Бесселя нулевого порядка  $J_0 x$  при  $x=0$ :  $J_0 x=0 = 1$ , а максимальное значение функции Бесселя первого порядка  $J_1 x = J_0' x$  при  $x=1,8411$ :  $J_1 x=1,8411 = 0,5819$ . С учётом этого и с учётом выражений для компонент напряжённости электрического поля волны типа  $E_{01}$  очевидно, что максимальное значение  $E_z$  больше максимального значения  $E_r$  и что максимальное значение напряжённости электрического поля получается на оси волновода.

Мощность, переносимая по волноводу волной любого типа, определяется интегрированием вектора Пойнтинга

$$\vec{\Pi}_{cp} = 1/2 \operatorname{Re} \left[ \vec{E} \cdot \vec{H}^* \right]$$

по поперечному сечению волновода

$$P_{cp} = \int_S \vec{\Pi}_{cp} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{2} \cdot \int_S \operatorname{Re} \left[ \vec{E} \times \vec{H}^* \right] \cdot d\vec{S}.$$

Запишем формулу для передаваемой мощности волны  $E_{01}$ , подставив выражения для составляющих поля, и вычислим входящие в эту формулу члены:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \frac{1}{2} \cdot \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{g^2} \cdot E_0^2 \cdot \left[ J_0' \cdot g \cdot r \right]^2 \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr = \\ &= \frac{\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot a^2 \cdot h}{Y_{01}^2} \cdot E_0^2 \cdot \int_0^a J_1^2 \cdot \left( \frac{Y_{01} \cdot r}{a} \right) \cdot r \cdot dr = \frac{\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot a^4 \cdot h}{2 \cdot Y_{01}^2} \cdot E_0^2 \cdot J_1^2 \cdot Y_{01} ; \end{aligned}$$

$Y_{01} = 2,405$ ,  $J_1 \cdot Y_{01} = J_1 \cdot 2,405 = 0,52$ ,  $a=0,025$  м, поперечное волновое число

$g = Y_{01} / a = 2,405 / 0,025 = 96,2 \text{ м}^{-1} = 0,962 \text{ см}^{-1}$ , продольное волновое число

$$h = \sqrt{\beta^2 - g^2} = \sqrt{\left( \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \right)^2 - g^2} = \sqrt{\left( \frac{6,28}{5} \right)^2 - 0,962^2} = 0,809 \text{ см}^{-1} = 80,9 \text{ м}^{-1},$$

круговая частота

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda_0} = \frac{6,28 \cdot 3 \cdot 10^8}{0,05} = 37,68 \cdot 10^9 \text{ рад/с.} \quad \varepsilon_0 = 8,842 \cdot 10^{-12}$$

Ф/м.

Определим максимальное значение напряженности электрического поля

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{Y_{01}}{a^2 \cdot J_1 \cdot Y_{01}} \sqrt{\frac{2 \cdot P_{cp}}{\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot h}} = \frac{2,405}{0,025^2 \cdot 0,52} \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 37,68 \cdot 10^9 \cdot 8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 80,9}} \\ &= 1,676 \cdot 10^5 \text{ В/м} = 1,676 \cdot 10^3 \text{ В/см.} \end{aligned}$$

Значение амплитуды напряженности магнитного поля у стенки волновода  $H_\varphi$   $r = a$  численно равно значению амплитуды поверхностной плотности тока  $J_{нов}$

$$\vec{H}_\varphi = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot \left[ \frac{a}{Y_{01}} \cdot J_1 \left( \frac{Y_{01} \cdot r}{a} \right) \right] \cdot e^{-j \cdot h \cdot z};$$

$$|J_{nos}| = |H_\varphi \text{ } r = a| = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot \left[ \frac{a}{Y_{01}} \cdot J_1 \text{ } Y_{01} \right] =$$

$$= 37,68 \cdot 10^9 \cdot 8,842 \cdot 10^{12} \cdot 1,676 \cdot 10^5 \cdot (0,025 \cdot 0,52/2,405) = 301,83 \text{ A/m} = 3,0183 \text{ A/cm}.$$

Ответ:  $E_{\max} = 1.676 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ ,  $J_{nos} = 3,0183 \text{ А/см}$ .

2.2.2.5 В круглом волноводе диаметром 5 см, заполненном диэлектриком без потерь, распространяется волна типа  $H_{11}$ . Частота колебаний 3 ГГц. Определить диэлектрическую проницаемость вещества, заполняющего волновод, если фазовая скорость волны равна скорости света в свободном пространстве.

Решение.

Вычислим значение величины длины волны генератора

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}.$$

Вычислим значение величины критической длины волны типа  $H_{11}$  в круглом волноводе для исходных данных задачи ( $m=1$ ,  $n=1$ ):

$$\lambda_{кр} (H_{mn}) = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{mn}} = \frac{6,28 \cdot 0,025}{1,841} = 0,08528 \text{ м} = 8,528 \text{ см},$$

где  $\mu_{mn}$  - корни первой производной от функции Бесселя  $J_m$ . Из таблицы 1.3 находим  $\mu_{11} = 1,841$ .

Запишем выражение для фазовой скорости для исходных данных задачи

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}}.$$

Из приведённого выражения находим формулу для расчёта численного значения диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего волновод, и вычисляем это значение:

$$\left( \frac{c}{v_\phi} \right)^2 = \varepsilon \cdot \mu - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2;$$

$$\varepsilon = \left[ \left( \frac{c}{v_{\phi}} \right)^2 + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2 \right] / \mu = \left[ 1^2 + \left( \frac{10}{8,528} \right)^2 \right] / 1 = 2,37.$$

Ответ:  $\varepsilon = 2,37$ .

2.2.2.6 Вычислить предельную мощность ( $P_{np}$  в  $\kappa Bm$ ), переносимую в круглом волноводе с внутренним радиусом  $a = 1 \text{ см}$  и с воздушным заполнением бегущей волной типа  $H_{11}$  и предельную мощность, переносимую этой же волной при коэффициенте бегущей волны  $K=0,5$ . Выбрать рабочую мощность  $P_{раб}$ . Предельная пробивная прочность для сухого воздуха  $E_{ПР} = 30 \text{ кВ/см}$ . Частота колебаний  $15 \text{ ГГц}$ .

Решение.

Вычислим значение величины длины волны генератора

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{15 \cdot 10^9} = 0,02 \text{ м} = 2 \text{ см}.$$

Предельная мощность, переносимая в круглом волноводе бегущей волной основного типа  $H$  волны  $H_{11}$  согласно формуле (1.39) равна:

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot E_{np}^2}{1,58} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{3,41 \cdot a} \right)^2} = \frac{3,14 \cdot 1^2 \cdot 30^2}{1,58} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{2}{3,41 \cdot 1} \right)^2} = 1448,6 \text{ кВт}.$$

Здесь  $a$  и  $\lambda$  в  $\text{см}$ ,  $E_{ПР}$  в  $\text{кВ/см}$ , а  $P_{ПР}$  в  $\text{кВт}$ .

Вычислим значение величины длины волны в волноводе по формуле (1.14):

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu - \lambda_0 / \lambda_{кр}^2}} = \frac{2}{\sqrt{1 \cdot 1 - \left( \frac{2}{3,41} \right)^2}} = 2,469 \text{ см},$$

где  $\lambda_{кр} = 3,41 \cdot a = 3,41 \cdot 1 = 3,41 \text{ см}$ . а относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости  $\varepsilon$  и  $\mu$  равны единице.

При коэффициенте бегущей волны  $K < 1$  предельная мощность уменьшится и для круглого волновода с воздушным заполнением определится по формуле (1.40):

$$P_{np} = \frac{450 \cdot 2a^2 \cdot \lambda \cdot K}{\lambda_{в}} = \frac{450 \cdot 2 \cdot 1^2 \cdot 2 \cdot 0,5}{2,469} = 729,04 \text{ кВт}.$$

Размерность единиц такая же, как и в формуле (1.39).

Выбираем рабочую мощность с коэффициентом запаса в пределах от 3 до 5:

$$P_{раб} = P_{np} / (3 \dots 5) = 1448,6 / (3 \dots 5) \text{ кВт}.$$

В итоге, примем рабочую мощность  $P_{раб} \approx 290 \text{ кВт}$ .

Ответ:  $P_{np} = 1448,6 \text{ кВт}$  при  $K=1$ ;  $P_{np} = 729,04 \text{ кВт}$  при  $K=0,5$ ;  $P_{раб} \approx 290 \text{ кВт}$ .

2.2.2.7 Определить погонные потери  $\Delta_{пог}$  (дБ/м) в круглом медном волноводе ( $\sigma=5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ) с внутренним радиусом  $a=1 \text{ см}$  и с воздушным заполнением для длины волны генератора  $\lambda=0,8 \cdot \lambda_{кр}$ : на волне основного типа  $H_{11}$ , на волне  $H_{01}$  и на волне  $E_{01}$ . Здесь  $\lambda_{кр}$  критическая (наибольшая) длины волны, которая может распространяться по волноводу данного радиуса. Охарактеризовать преимущества использования каждого из этих типов волн.

Решение.

Для волны основного типа  $H_{11}$  критическая длина волны  $\lambda_{кр}=3,41 \cdot a$  и  $\lambda=0,8 \cdot \lambda_{кр}=0,8 \cdot 3,41 \cdot a=0,02728 \text{ м}$ . Вычислим значение погонных потерь  $\Delta_{пог}$  на волне  $H_{11}$  по формуле, где все линейные размеры подставляют в м:

$$\Delta_{пог} = \frac{0,793}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda}{3,41a}\right)^2\right]}} \cdot \left[ \left(\frac{\lambda}{3,41a}\right)^2 + 0,418 \right] =$$

$$= \frac{0,793}{0,01 \cdot \sqrt{5,7 \cdot 10^7 \cdot 0,02728 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,02728}{3,41 \cdot 0,01}\right)^2\right]}} \cdot \left[ \left(\frac{0,02728}{3,41 \cdot 0,01}\right)^2 + 0,418 \right] = 0,1121 \text{ дБ/м.}$$

Для волны типа  $H_{01}$  критическая длина волны  $\lambda_{кр}=1,64 \cdot a$  и  $\lambda=0,8 \cdot \lambda_{кр}=0,8 \cdot 1,64 \cdot a=0,01312 \text{ м}$ . Вычислим значение погонных потерь  $\Delta_{пог}$  на волне  $H_{01}$ :

$$\Delta_{пог} = \frac{0,793 \cdot \left(\frac{\lambda}{1,64 \cdot a}\right)^2}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1,64a}\right)^2\right]}} = \frac{0,793 \cdot \left(\frac{0,01312}{1,64 \cdot 0,01}\right)^2}{0,01 \cdot \sqrt{5,7 \cdot 10^7 \cdot 0,01312 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,01312}{1,64 \cdot 0,01}\right)^2\right]}} =$$

$$= 0,07756 \text{ дБ/м.}$$

Для волны типа  $E_{01}$  критическая длина волны  $\lambda_{кр}=2,61 \cdot a$  и  $\lambda=0,8 \cdot \lambda_{кр}=0,8 \cdot 2,61 \cdot a=0,02088 \text{ м}$ . Вычислим значение погонных потерь  $\Delta_{пог}$  на волне  $E_{01}$  по формуле (1.42 а):

$$\Delta_{пог} = \frac{0,793}{a \cdot \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2,61a}\right)^2\right]}} = \frac{0,793}{0,01 \cdot \sqrt{5,7 \cdot 10^7 \cdot 0,02088 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,02088}{2,61 \cdot 0,01}\right)^2\right]}} =$$

$$= 0,1211 \text{ дБ/м.}$$

Ответ:

для волны основного типа  $H_{11}$  погонные потери  $\Delta_{\text{ПОГ}} = 0,1121 \text{ дБ/м}$ , но этот тип имеет при заданном радиусе волновода наибольшую критическая длина волны  $\lambda_{\text{кр}} = 0,02728 \text{ м}$ ;

для волны типа  $H_{01}$  погонные потери наименьшие  $\Delta_{\text{ПОГ}} = 0,07756 \text{ дБ/м}$ ;

для волны типа  $E_{01}$  погонные потери  $\Delta_{\text{ПОГ}} = 0,1211 \text{ дБ/м}$ , но этот тип имеет при заданном радиусе волновода наибольшую предельную мощность и используется во вращающихся сочленениях.

### 2.2.3 Пример решения задачи по расчету размеров $\Pi$ - и $H$ - волноводов

2.2.3.1 Определить размеры  $a$ ,  $l$ ,  $g$ ,  $h$  для  $\Pi$ - и  $H$ - волноводов (рисунок 2.1), обеспечивающие минимальные габариты, минимальные потери и максимальную пропускаемую мощность, если самая короткая длина волны рабочего диапазона  $\lambda_{\text{min}} = 3 \text{ см}$ , а отношение  $\eta$  между критическими длинами волн типов  $H_{10}$  ( $\lambda_{\text{кр}10}$ ) и  $H_{20}$  ( $\lambda_{\text{кр}20}$ ) равно 3.5 ( $\eta = \frac{\lambda_{\text{кр}10}}{\lambda_{\text{кр}20}} = 3.5$ ).

Решение.

Выбираем размер  $2l$  на 20% меньше самой короткой длины волны рабочего диапазона  $\lambda_{\text{min}}$ , что обеспечивает минимальные габариты при условии, что волновод остается одноволновым

$$2l = 0,8 \cdot \lambda_{\text{min}} = 0,8 \cdot 3 = 2,4 \text{ см.}$$

Минимальные потери и максимальная пропускаемая мощность при

$$\frac{a}{l} = 0,3 \div 0,4 ; \quad (1.45)$$

Выберем  $\frac{a}{l} = 0,3$ , откуда получим  $2a = 0,3 \cdot 2l = 0,72 \text{ см}$ .

Зададимся  $2h = 2l = 2,4 \text{ см}$ . Выберем с помощью таблицы 2.3 отношение  $g/h$  в зависимости от  $\frac{a}{l} = 0,3$  и от требуемого отношения между критическими длинами волн типов  $H_{10}$  ( $\lambda_{\text{кр}10}$ ) и  $H_{20}$  ( $\lambda_{\text{кр}20}$ )  $\eta = 3,5$ :  $g/h = 0,35$ . Откуда получим  $2g = 0,35 \cdot 2h = 0,35 \cdot 2,4 = 0,84 \text{ см}$ .

Ответ: при  $\lambda_{\text{min}} = 3 \text{ см}$  минимальные габариты, минимальные потери и максимальную пропускаемую мощность при отношении между критическими длинами волн типов  $H_{10}$  ( $\lambda_{\text{кр}10}$ ) и  $H_{20}$  ( $\lambda_{\text{кр}20}$ )  $\eta = 3.5$  обеспечивается при следующих размерах  $\Pi$ - и  $H$ - волноводов (рисунок 1.1)  $2a = 0,72 \text{ см}$ ,  $2l = 2,4 \text{ см}$ ,  $g, h = 2,4/2 = 1,2 \text{ см}$   $g = 0,84/2 = 0,42 \text{ см}$ .

### 2.2.4 Примеры решения задач по расчету параметров полосковых волноводов

2.2.4.1 Рассчитать волновое сопротивление, погонные индуктивность и емкость несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком с  $\epsilon = 2,08$ . Параметры линии: ширина токонесущей полосы

$b = 7 \text{ мм}$ , толщина диэлектрика  $d = 1 \text{ мм}$ , толщина полоски  $t = 0,05 \text{ мм}$ . Потерями в линии пренебречь.

Решение.

Для выбора приближенных соотношений для расчёта погонной ёмкости  $C$  ( $\Phi/\text{м}$ ) и волнового сопротивления  $Z_{\epsilon}$  с учетом толщины токонесущего проводника для несимметричной полосковой линии передачи находим отношение

$$b/d = \left(\frac{7}{1}\right) = 7.$$

Вычислим величину погонной ёмкости  $C$  ( $\Phi/\text{м}$ ) и волнового сопротивления  $Z_{\epsilon}$ , используя формулы, рекомендованные для  $b/d > 2$ .

$$\begin{aligned} C_1 &= 1,06 \cdot 10^{-11} \cdot \epsilon \cdot \left(1 + \frac{b}{d} \cdot 1 - \frac{t}{d}^{-1}\right) = \\ &= 1,06 \cdot 10^{-11} \cdot 2,08 \cdot \left[1 + \frac{7}{1} \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,05/1}\right)^{-1}\right] = 184,5 \text{ нФ}. \end{aligned}$$

$$Z_B = 314 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \left[1 + \frac{b}{d} \cdot 1 - \frac{t}{d}^{-1}\right]^{-1} = \sqrt{\frac{1}{2,08}} \cdot \frac{314}{1 + \frac{7}{1} \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,05/1}\right)} = 26,2 \text{ Ом}.$$

Так как  $Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , то погонная индуктивность  $L$  равна

$$L = C \cdot Z_{\epsilon}^2 = 184,5 \cdot 10^{-12} \cdot 26,2^2 = 0,125 \frac{\text{мкГн}}{\text{м}}.$$

Ответ:  $Z_{\epsilon} = 26,2 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,125 \text{ мкГн/м}$ ,  $C = 184,5 \text{ нФ/м}$ .

2.2.4.2 Определить волновое сопротивление  $Z_{\epsilon}$  несимметричной полосковой линии передачи, если известно, что в качестве диэлектрика используется материал с  $\epsilon = 2,55$ , а погонная емкость линии  $C_1 = 60 \text{ нФ/м}$ .

Решение.

Для расчёта волнового сопротивления  $Z_{\epsilon}$  без учёта толщины токонесущего проводника для несимметричной полосковой линии передачи используем приближенное соотношение

$$Z_B = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{314}{1 + b/d} = \sqrt{\frac{1}{2,55}} \cdot \frac{314}{1 + b/d} = \frac{196,6}{1 + b/d}$$

Величину  $1 + \frac{b}{d}$ , необходимую для вычисления  $Z_{\epsilon}$  найдём из выражения для погонной ёмкости  $C_1$  ( $\Phi/m$ ) несимметричной полосковой линии передачи  $C_1 = 1,06 \cdot 10^{-11} \cdot \epsilon \cdot 1 + \frac{b}{d}$  ( $t/d \ll 1$ ,  $b/d > 0,6$ ):

$$1 + \frac{b}{d} = \frac{C_1}{1,06 \cdot 10^{-11} \cdot \epsilon} = \frac{60 \cdot 10^{-12}}{1,06 \cdot 10^{-11} \cdot 2,55} = 2,22.$$

В итоге получим

$$Z_B = \frac{196,6}{1 + \frac{b}{d}} = \frac{196,6}{2,22} = 88,6 \text{ Ом.}$$

Ответ:  $Z_B = 88,6 \text{ Ом.}$

2.2.4.3 Определить волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи с твердым диэлектриком, если известно, что длина волны в линии  $\lambda_{\epsilon} = 10 \text{ см}$ , а погонная ёмкость  $C_1 = 100 \text{ нФ/м}$ . Рабочая частота  $f = 2 \text{ ГГц}$ .

Решение.

Определим длину волны генератора  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} = 0,15 \text{ м} = 15 \text{ см.}$$

Определим эффективную диэлектрическую проницаемость в полосковом волноводе при  $\mu=1$  из выражения:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{\epsilon}} \right)^2 = \left( \frac{15}{10} \right)^2 = 2,25.$$

Определим волновое сопротивление из выражения для постоянной времени

$$\tau = \frac{l}{v} = Z_{\epsilon} \cdot C_1 \cdot l,$$

где  $v = c / \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}$ , а  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме.

В итоге получим

$$Z_{\epsilon} = \frac{1}{v \cdot C_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}{c \cdot C_1} = \frac{\sqrt{2,25}}{3 \cdot 10^8 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 50 \text{ Ом.}$$

Ответ:  $Z_{\epsilon} = 50 \text{ Ом.}$

2.2.4.4 Линия, питаемая генератором синусоидального напряжения с частотой  $f = 25 \text{ МГц}$ , имеет погонные параметры  $C_1 = 64 \text{ нФ/м}$  и  $L_1 = 0,252 \text{ мкГн/м}$ . Найти фазовую скорость и длину волны в линии.

Решение.

Вычислим фазовую скорость для исходных данных задачи

$$v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{\sqrt{64 \cdot 10^{-12} \cdot 0,252 \cdot 10^{-6}}} = 2,49 \cdot 10^8 \frac{м}{с}.$$

Вычислим длину волны в полосковом волноводе

$$\lambda_g = \frac{v_{\phi}}{f} = \frac{2,49 \cdot 10^8}{25 \cdot 10^6} = 9,96 м.$$

Ответ:  $v_{\phi} = 2,49 \cdot 10^8 м/с$ ,  $\lambda_g = 9,96 м$ .

2.2.4.5 Определить погонные параметры несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком, если известно, что длина волны в линии  $\lambda_g = 7 см$ , а волновое сопротивление  $50 Ом$ . Рабочая частота  $3 ГГц$ .

Решение.

Определим длину волны генератора  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,1 м = 10 см.$$

Определим эффективную диэлектрическую проницаемость в полосковом волноводе при  $\mu=1$ :

$$\epsilon_{эфф} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 = \left( \frac{10}{7} \right)^2 = 2,04.$$

Определим погонную ёмкость  $C_1$  из выражения для волнового сопротивления

$$Z_g = \frac{1}{v \cdot C_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{эфф}}}{c \cdot C_1},$$

где  $v = c / \sqrt{\epsilon_{эфф}}$ , а  $c = 3 \cdot 10^8 м/с$  – скорость света в вакууме.

Вычислим эту погонную ёмкость  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_{эфф}}}{c \cdot Z_g} = \frac{\sqrt{2,04}}{3 \cdot 10^8 \cdot 50} = 95,2 \cdot 10^{-12} = 95,2 \frac{пФ}{м}.$$

Определим погонную индуктивность  $L_1$  из выражения для волнового сопротивления

$$Z_g = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

и вычислим эту погонную индуктивность

$$L_1 = Z_0^2 \cdot C_1 = 50^2 \cdot 95,2 \cdot 10^{-12} = 0,24 \frac{\text{мкГн}}{\text{м}}.$$

Ответ:  $L_1 = 0,24 \text{ мкГн/м}$ ,  $C_1 = 95,2 \text{ нФ/м}$ .

2.2.4.6 Рассчитать погонное затухание в несимметричной полосковой линии передачи, заполненной воздухом. Размеры поперечного сечения линии:  $b = 12 \text{ мм}$ ,  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $t = 0.05 \text{ мм}$ . Линия выполнена из меди ( $\sigma = 5.7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ). Рабочая частота  $500 \text{ МГц}$ .

Решение.

Вычислим величину поверхностного сопротивления для  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  и для величины удельной проводимости меди  $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ .

$$R_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \mu_0}{2 \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{6,28 \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 5,7 \cdot 10^7}} = 0,00588 \text{ Ом}.$$

Вычислим коэффициент  $K_H$ , учитывающий неравномерность распределения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения несимметричной полосковой линии

$$K_H \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{2t}{d}} + 4 \cdot \frac{t}{d} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{0,05}{2}} + 4 \cdot \frac{0,05}{2} = 0,55.$$

Определим коэффициент ослабления  $\alpha_M$ , обусловленный потерями в проводящих пластинах несимметричной полосковой линии из выражения

$$\alpha_M = \frac{R_s}{120 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \left| \frac{\ln\left(\frac{r_A \cdot K_H}{2}\right)}{\ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right)} \right| \quad \text{Нп/м},$$

в котором численные значения коэффициентов  $r_A$  и  $r_B$  находят из таблицы 2.4 в зависимости от значений величин отношений размеров линии  $\frac{t}{d}$  и  $\frac{b}{d}$ . Для

$$\frac{t}{d} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \quad \text{и} \quad \frac{b}{d} = \frac{12}{2} = 6: \quad r_B = 16,7708, \quad \text{а} \quad r_A = 3,7127 \cdot 10^{-5}.$$

Вычислим коэффициент ослабления  $\alpha_M$ :

$$\alpha_M = \frac{R_s}{120 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \left| \frac{\ln\left(\frac{r_A \cdot K_H}{2}\right)}{\ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right)} \right| =$$

$$= \frac{0,00588}{120 \cdot 3,14 \cdot 0,002} \sqrt{\frac{1}{1}} \cdot \left| \frac{\ln\left(\frac{3,7127 \cdot 10^{-5} \cdot 0,55}{2}\right)}{\ln\left(\frac{16,7708}{3,7127 \cdot 10^{-5}}\right)} \right| = 0,00688 \text{ Нн/м.}$$

Вычислим погонное затухание  $\Delta_{\text{ПОГ}}$ :

$$\Delta_{\text{ПОГ}} = 8,868 \cdot \alpha_M = 8,686 \cdot 0,00688 = 0,0598 \text{ дБ/м.}$$

Ответ: погонное затухание  $\Delta_{\text{ПОГ}} = 0,0598 \text{ дБ/м.}$

2.2.4.7 Определить погонное затухание в несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком. Длина волны в линии 5 см. Параметры линии:  $b = 2 \text{ мм}$ ,  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $t = 0,05 \text{ мм}$ . Относительная проницаемость диэлектрика  $\varepsilon = 9$ ,  $\text{tg } \delta_\varepsilon = 8 \cdot 10^{-4}$ . Токонесущая полоска и заземленная пластина выполнены из меди ( $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ). Какова при этом доля потерь в металле и в диэлектрике?

Решение.

Определим длину волны генератора  $\lambda_0$

$$\lambda_0 = \lambda_\varepsilon \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}} = 5 \cdot \sqrt{9} = 15 \text{ см}$$

и частоту генератора

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,15} = 2 \cdot 10^9 = 2 \text{ ГГц}$$

Определим величину поверхностного сопротивления для  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  и для величины удельной проводимости меди  $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$

$$R_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \mu_0}{2 \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{6,28 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 5,7 \cdot 10^7}} = 0,01176 \text{ Ом.}$$

Вычислим коэффициент  $k_n$ , учитывающий неравномерность распределения

напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения несимметричной полосковой линии

$$k_n \approx 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{t}{d}} + 4 \cdot \frac{t}{d} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{0,05}{2}} + 4 \cdot \frac{0,05}{2} = 0,547.$$

Определим численные значения коэффициентов  $r_A$  и  $r_B$  из таблицы 2.4

в зависимости от значений величин отношений размеров линии  $\frac{t}{d}$  и

$$\frac{b}{d}.$$

Для  $\frac{t}{d} = \frac{0,05}{2} = 0,025$  и  $\frac{b}{d} = \frac{2}{2} = 1$ :  $r_B = 5,1289$ , а  $r_A = 1,0365 \cdot 10^{-1}$ .

Вычислим коэффициент ослабления  $\alpha$ , обусловленный потерями в проводящих пластинах несимметричной полосковой линии из выражения

$$\alpha = \frac{R_s}{120 \cdot \pi \cdot d} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \frac{\left| \ln \left( \frac{r_A \cdot k_u}{2} \right) \right|}{\left| \ln \left( \frac{r_B}{r_A} \right) \right|} =$$

$$= \frac{0,01176}{120 \cdot 3,14 \cdot 0,002} \sqrt{\frac{9}{1}} \cdot \frac{\left| \ln \left( \frac{1,0365 \cdot 10^{-1} \cdot 0,547}{2} \right) \right|}{\left| \ln \left( \frac{5,1289}{1,0365 \cdot 10^{-1}} \right) \right|} = 0,00427 \text{ Нн/м.}$$

Вычислим погонное затухание  $\Delta_{\text{Пог}}$ , обусловленное потерями в проводящих пластинах

$$\Delta_M = 8,686 \cdot \alpha = 8,686 \cdot 0,00427 = 0,371 \text{ дБ/м.}$$

Вычислим коэффициент ослабления  $\alpha_\delta$ , обусловленный потерями в диэлектрике

$$\alpha_\delta = \frac{1}{2} \cdot \omega \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a} \cdot \text{tg} \delta =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 6,28 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{9 \cdot 8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 0,05023 \text{ Нн/м.}$$

Вычислим погонное затухание, обусловленное потерями в диэлектрике

$$\Delta_\delta = 8,686 \cdot \alpha_\delta = 8,686 \cdot 0,05023 = 0,4363 \text{ дБ/м.}$$

Вычислим полное погонное затухание

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_\delta = 0,371 + 0,4363 = 0,8073 \text{ дБ/м.}$$

Ответ:  $\Delta = 0,8073 \text{ дБ/м}$ , доля потерь составляет  $0,371 \text{ Дб/м}$  в металле и  $0,4363 \text{ Дб/м}$  в диэлектрике.

2.2.4.8 Между проводниками микрополоскового волновода создано гармоническое напряжение с амплитудой  $U_m = 250 \text{ В}$ . Параметры линии:  $b = 4 \text{ мм}$ ,  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $\varepsilon = 2,1$ . Вычислить амплитуду вектора плотности поверхностного электрического тока  $J_{\text{мнов}}$  на проводящей полоске.

Решение.

Вычислим волновое сопротивление  $Z_g$  без учёта толщины токонесущего проводника для несимметричной полосковой линии передачи по приближённой эмпирической формуле при  $\varepsilon = 2,1$ ,  $b = 4 \text{ мм}$  и  $d = 1 \text{ мм}$ :

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{314}{1 + \frac{b}{d}} = \sqrt{\frac{1}{2,1}} \cdot \frac{314}{1 + \frac{4}{1}} = 43,332 \text{ Ом}.$$

Вычислим амплитуду  $I_m$  электрического тока на проводящей полоске

$$I_m = \frac{U_m}{Z_{\epsilon}} = \frac{250}{43,332} = 5,77 \text{ А}.$$

Вычислим амплитуду вектора плотности поверхностного электрического тока на этой полоске

$$J_{m \text{ пов}} = \frac{I_m}{b} = \frac{5,77}{4} = 1,44 \text{ А/мм}.$$

Ответ: амплитуда вектора плотности поверхностного тока  $J_{m \text{ пов}} = 1,44$  А/мм.

2.2.4.9 Для 70 - омной микрополосковой линии определить отношение ширины полоски  $b$  к толщине подложки  $d$  ( $b/d$ ), если относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки  $\epsilon = 2$ . Толщина полоски пренебрежимо мала.

Решение.

Для определения отношения ( $b/d$ ) запишем приближённую эмпирическую формулу для волнового сопротивления  $Z_B$  без учёта толщины токонесущего проводника для несимметричной полосковой линии

$$Z_B = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{314}{1 + b/d}$$

и найдём отношение ( $b/d$ ) из выражения

$$b/d = \frac{314 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{Z_{\epsilon}} - 1 = \frac{314 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}}{70} - 1 = 2,17.$$

Приближённое значение отношения ( $b/d$ )=2,17 используем для уточнённого расчёта величины ( $b/d$ ), который начинается с определения поправочного коэффициента  $p$ , необходимого для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{эфф}}$ .

$$p = \begin{cases} \left(1 + 12 \cdot \frac{d}{b}\right)^{-1/2}, & \frac{b}{d} \geq 1 \\ \left(1 + 12 \cdot \frac{d}{b}\right)^{-1/2} + 0,04 \cdot \left(1 - \frac{b}{d}\right)^2, & \frac{b}{d} \leq 1 \end{cases}.$$

$$p\left(\frac{b}{d} = 2,17\right) = \frac{1}{\left[1 + \frac{1,12}{\left(\frac{b}{d}\right)}\right]^{0,5}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1,12}{2,17}\right]^{0,5}} = 0,813.$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{эфф}}\left(\frac{b}{d} = 2,17\right) &= 0,5 \cdot \varepsilon + 1 + 0,5 \cdot \varepsilon - 1 \cdot p = \\ &= 0,5 \cdot 2 + 1 + 0,5 \cdot 2 - 1 \cdot p = 1,5 + 0,5p = 1,5 + 0,5 \cdot 0,813 = 1,9065. \end{aligned}$$

С помощью полученного значения  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  вычислим волновое сопротивление по формуле (1.70) при  $(b/d) = 2,17 > 1$

$$\begin{aligned} Z_{\varepsilon}\left(\frac{b}{d} = 2,17\right) &= \frac{377/\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}}{b/d + 1,393 + 0,667 \cdot \ln b/d + 1,444} = \\ &= \frac{377/\sqrt{1,9065}}{2,17 + 1,393 + 0,667 \ln 2,17 + 1,444} = 61,623 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

С уменьшением отношения  $(b/d)$  волновое сопротивление  $Z_{\varepsilon}$  увеличивается, поэтому для того чтобы получить расчётное значение  $Z_{\varepsilon} = 70 \text{ Ом}$  большее чем  $Z_{\varepsilon} = 61,623 \text{ Ом}$  следует выбрать  $(b/d) < 2,17$ . Выбираем отношение  $(b/d) = 2$  и снова повторяем расчёт  $p$ ,  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  и  $Z_{\varepsilon}$ .

$$p\left(\frac{b}{d} = 2\right) = \frac{1}{\left[1 + \frac{1,12}{\left(\frac{b}{d}\right)}\right]^{0,5}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1,12}{2,00}\right]^{0,5}} = 0,8006.$$

$$\varepsilon_{\text{эфф}}\left(\frac{b}{d} = 2\right) = 1,5 + 0,5p = 1,5 + 0,5 \cdot 0,8006 = 1,9003.$$

Приближённое значение отношения  $(b/d) = 2,17$  используем для уточнённого расчёта величины  $(b/d)$ , который начинается с определения поправочного коэффициента  $p$ , необходимого для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ .

$$\begin{aligned} Z_{\varepsilon}\left(\frac{b}{d} = 2\right) &= \frac{377/\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}}{b/d + 1,393 + 0,667 \cdot \ln b/d + 1,444} = \\ &= \frac{377/\sqrt{1,9003}}{2 + 1,393 + 0,667 \ln 2 + 1,444} = 84,95 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Скорость изменения отношения  $(b/d)$  при изменении волнового сопротивления  $Z_{\varepsilon}$  равна

$$\frac{\partial b/d}{\partial Z_e} = \frac{\left(\frac{b}{d} = 2,17\right) - \left(\frac{b}{d} = 2\right)}{Z_e\left(\frac{b}{d} = 2,17\right) - Z_e\left(\frac{b}{d} = 2\right)} = \frac{2,17 - 2}{61,623 - 84,95} = -0,00729 \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Тогда

$$b/d \ Z_e = 70 \text{ Ом} = b/d \ Z_e = 61,623 \text{ Ом} + \frac{\partial b/d}{\partial Z_e} [ Z_e = 70 - Z_e = 61,623 ] = 2,17 - 0,00729 \cdot 8,377 = 2,11.$$

Ответ: по приближённой формуле  $b/d \ Z_e = 70 \text{ Ом} = 2,17$ , а при уточнённом расчёте  $b/d \ Z_e = 70 \text{ Ом} = 2,11$ .

1.2.2.4.10 Определить физические размеры отрезка микрополосковой линии передачи, электрическая длина которого равна  $\lambda_g/2$  на частоте 4 ГГц. Волновое сопротивление линии 50 Ом. Относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию равна 10, а относительная магнитная проницаемость  $\mu = 4$ . Толщина проводника бесконечно мала.

Решение.

Вычислим значение величины отношения  $(b/d)$  по формуле, выведенной в предыдущей задаче

$$b/d = \frac{314 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{Z_e} - 1 = \frac{314 \cdot \sqrt{\frac{4}{10}}}{50} - 1 = 2,969.$$

Определим эффективную диэлектрическую проницаемость из выражения, справедливого для  $(b/d) > 1$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{эф} &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon + 1 + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon - 1 \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{d}{b}\right)^{-1/2} = . \\ &= \frac{1}{2} \cdot 10 + 1 + \frac{1}{2} \cdot 10 - 1 \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{1}{2,969}\right)^{-1/2} = 7,504. \end{aligned}$$

Определим длину волны в полосковом волноводе  $\lambda_g$ , приближённо считая эффективную магнитную проницаемость  $\mu = \mu_{эф}$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{эф} \cdot \mu_{эф}}} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{эф} \cdot \mu_{эф}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{7,504 \cdot 4}} = 1,37 \text{ см.}$$

где  $\lambda_0 = c / f$  — длина волны генератора,  $f$  — частота генератора, а  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света.

Вычислим значение длины отрезка микрополосковой линии, электрическая длина которого равна  $\lambda_g/2$

$$l = \lambda_g/2 = 1,37/2 = 0,685 \text{ см.}$$

Вычислим значение ширины полоски микрополосковой линии, приняв значение толщины диэлектрика равным 1 мм.

$$b = d \cdot b/d = 1 \cdot 2,969 = 2,969 \text{ мм.}$$

Ответ:  $l = \lambda_g/2 = 1,37/2 = 0,685 \text{ см}$ ,  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $b = 2,969 \text{ мм}$ .

2.3 Задачи для самостоятельной работы по расчету параметров волноводных линий передач

2.3.1 Задачи по расчету параметров прямоугольных волноводов

2.3.1.1. В прямоугольном волноводе сечением  $a \times b \text{ см}^2$  распространяется волна типа  $H_{11}$ . Волновод заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Частота колебаний  $f \text{ ГГц}$ . Определить фазовую и групповую скорости и длину волны в волноводе. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.5 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.5

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\epsilon$	1,25	1,15	1,28	1,3	1,35	1,32	1,38	1,25	1,17	1,25
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a \times b \text{ см}^2$	4,2 $\times 3,1$	4 $\times 3,2$	4,1 $\times 3,3$	3,9 $\times 3$	3,9 $\times 2,8$	4,2 $\times 3,1$	4 $\times 3,2$	4,1 $\times 3,3$	3,9 $\times 3$	3,9 $\times 2,8$
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f, \text{ ГГц}$	8	8,6	8,2	8,7	8,4	7,9	8,1	8,3	8,5	7,7

2.3.1.2. Определить характеристическое сопротивление волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $a \times b \text{ см}^2$  при частоте колебаний  $f \text{ ГГц}$ . Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.6 с исходными данными согласно варианту задания.

2.3.1.3. Определить погонное затухание волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $a \times b \text{ см}^2$  при частоте поля  $f \text{ ГГц}$ . Материал стенок волновода – медь ( $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ). Вариант задания для этой задачи назна-

чается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.6 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.6

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$a$ , см	7,25	7,15	7,18	7,3	7,35	7,28	7,38	1,25	7,17	7,28
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b$ , см	3,25	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	3,65	3,45	3,35
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , ГГц	3,1	3,2	3,3	3	2,8	3,1	3,2	3,3	3	2,8

2.3.1.4. Определить предельную мощность ( $P_{пр}$  в  $\kappa Вт$ ), переносимую бегущей волной типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе сечением  $a \times b$   $см^2$  с воздушным заполнением при давлении  $H$   $\kappa Па$  и температуре  $t$ ,  $^{\circ}C$ . Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.7 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.7

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$H, \text{кПа}$	100	50	80	60	70	80	60	70	100	50
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a \times b \text{ см}^2$	4,2 $\times 3,1$	4 $\times 3,2$	4,1 $\times 3,3$	3,9 $\times 3$	3,9 $\times 2,8$	4,2 $\times 3,1$	4 $\times 3,2$	4,1 $\times 3,3$	3,9 $\times 3$	3,9 $\times 2,8$
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, \text{°C}$	20	80	50	60	100	80	60	30	70	40

### 2.3.2 Задачи по расчету параметров круглых волноводов

2.3.2.1. Какие типы волн могут распространяться в круглом волноводе диаметром  $2a \text{ см}$ , заполненном диэлектриком с относительной проницаемостью  $\varepsilon$  на частоте  $f \text{ ГГц}$ . Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.8 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.8

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$2a, \text{см}$	3,1	3,2	3,3	3	2,8	3,1	3,2	3,3	3	2,8
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f, \text{ГГц}$	10,1	11,2	10,3	9,7	9,8	11,1	9,2	9,3	11,3	9,8
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon$	3,4	3,2	3,3	3,5	2,8	3,1	3,25	3,35	3,15	3,4

2.3.2.2. Определить погонные потери  $\Delta_{\text{ПОГ}}$  (дБ/м) в круглом волноводе с внутренним радиусом  $a \text{ см}$  и с воздушным заполнением для длины волны генератора  $\lambda = k \cdot \lambda_{\text{кр}}$ : на волне основного типа  $H_{11}$ , на волне  $H_{01}$  и на волне

$E_{01}$ . Здесь  $\lambda_{кр}$  критическая (наибольшая) длины волны, которая может распространяться по волноводу данного радиуса. Удельная электропроводность внутренней поверхности волноводной трубы равна  $\sigma$  См/м. Охарактеризовать преимущества использования каждого из этих типов волн. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.9 с исходными данными согласно варианту задания.

2.3.2.3. Вычислить предельную мощность ( $P_{пр}$  в кВт), переносимую в круглом волноводe с внутренним радиусом  $a$  и с воздушным заполнением бегущей волной типа  $H_{11}$  и предельную мощность, переносимую этой же волной при коэффициенте бегущей волны  $K$ . Выбрать рабочую мощность  $P_{раб}$ . Предельная пробивная прочность для сухого воздуха  $E_{пр} = 30$  кВ/см. Частота колебаний  $f$  ГГц. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.10 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.9

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$a$ , см	1,1	1,2	1,3	0,9	0,85	0,95	1,15	1,25	1,35	0,8
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k$	0,55	0,65	0,75	0,85	0,7	0,6	0,5	0,75	0,85	0,9
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma$ , См/м)	$5,7 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$

Таблица 2.10

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$a, \text{ см}$	1,1	1,2	1,3	0,9	0,85	0,95	1,15	1,25	1,35	0,8
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K$	0,55	0,65	0,75	0,85	0,7	0,6	0,5	0,75	0,85	0,8
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f, \text{ ГГц}$	15,5	14,5	16,5	15,5	14,8	16,2	15,5	14,5	16,5	15,5

### 2.3.3 Задача по расчету параметров $P$ - и $H$ - волноводов

2.3.3.1 Определить размеры  $a, l, g, h$  для  $P$ - и  $H$ - волноводов (рисунок 2.1), обеспечивающие минимальные габариты, минимальные потери и максимальную пропускаемую мощность, если самая короткая длина волны рабочего диапазона  $\lambda_{min}$  см, а отношение между критическими длинами волн типов  $H_{10}$  ( $\lambda_{кр10}$ ) и  $H_{20}$  ( $\lambda_{кр20}$ ) равно  $\eta$  ( $\eta = \frac{\lambda_{кр10}}{\lambda_{кр20}}$ ). Вариант задания для этой

задачи назначается преподавателем, и состоит из двух цифр. Ниже приведена таблица 2.11 с исходными данными согласно варианту задания. В случае, если преподавателем задан вариант из трёх цифр, то последняя цифра варианта для выбора данных не используется

Таблица 2.11

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\lambda_{min}, \text{ см}$	3,4	3,2	3,3	3,5	2,8	3,1	3,25	3,35	3,15	3,4
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\eta$	4.4	3.7	3.5	3.2	4.8	4.1	3.6	3.4	3.2	4.8

## 2.3.4 Задачи по расчету параметров полосковых волноводов

2.3.4.1 Рассчитать волновое сопротивление, погонные индуктивность и ёмкость несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком с  $\varepsilon$ . Параметры линии: ширина токонесущей полоски  $b$  мм, толщина диэлектрика  $d$ , мм, толщина полоски  $t = 0,05$  мм. Потерями в линии пренебречь. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.12 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.12

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\varepsilon$	2,4	2,2	2,3	2,45	1,8	2,1	2,15	2,25	2,15	2,3
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b$ , мм	7,55	6,65	6,75	6,85	7,1	7,6	7,65	7,5	7,85	7,4
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	1,1	1,2	1,3	0,9	0,85	0,95	1,15	1,25	1,35	0,8

2.3.4.2. Определить волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи с твердым диэлектриком, если известно, что длина волны в линии  $\lambda_g$  см, а погонная ёмкость  $C_1$  нФ/м. Рабочая частота  $f$  ГГц. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.13 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.13

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\lambda_g$ , см	10,5	11,5	12,5	9,5	9,8	10,2	9,55	12	9,6	9,7
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_1$ , нФ/м	100	110	120	130	90	85	105	115	124	95
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , ГГц	2,4	2,2	2,3	2,45	1,8	2,1	2,15	2,25	2,15	2,3

2.3.4.3. Определить погонные параметры несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком, если известно, что длина волны в линии  $\lambda_g$  см, а волновое сопротивление  $Z_g$  Ом. Рабочая частота  $f$  ГГц. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.14 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.14

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\lambda_g$ , см	7,55	6,65	6,75	6,85	7,1	7,6	7,65	7,5	7,85	7,4
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Z_g$ , Ом	63	50	55	60	70	65	68	53	62	58
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , ГГц	3,4	3,2	3,3	3,45	2,8	3,1	3,15	3,25	3,15	3,3

2.3.4.4 Определить погонное затухание в несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком. Длина волны в линии  $\lambda_g$ , см. Параметры линии:  $b$  мм,  $d$  мм,  $t = 0.05$  мм. Относительная проницаемость диэлектрика  $\varepsilon = 9$ ,  $tg \delta_\varepsilon = 8 \cdot 10^{-4}$ . Токонесущая полоска и заземленная пластина выполнены из меди ( $\sigma = 5.7 \cdot 10^7$  См/м). Какова при этом доля потерь в металле и в диэлектрике? Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.15 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.15

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\lambda_g$ , см	5,55	5,65	5,75	5,8	5,1	5,5	5,1	4,9	4,8	5,4
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b$ , мм	2,4	2,2	2,3	2,45	1,8	2,1	2,15	2,25	2,15	2,3
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	2,45	1,8	2,1	2,4	2,2	2,3	2,1	2,3	2,25	2,15

2.3.4.5. Определить физические размеры отрезка микрополосковой линии передачи, электрическая длина которого равна  $\lambda_g/2$  на частоте 4 ГГц. Волновое сопротивление линии 50 Ом. Относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию равна 10, а относительная магнитная проницаемость  $\mu = 4$ . Толщина проводника бесконечно мала. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.16 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.16

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$f$ , ГГц	4.4	3.7	3.6	3.9	4.8	4.1	3.6	3.4	3.7	4.2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Z_0$ , Ом	53	47	55	60	50	55	58	53	52	48
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon$	11	12	13	9	9,85	9,5	11,5	11,2	10,3	8,9

### 3 Тема 3. Энергетические соотношения в линиях передач

3.1 Основные формулы для расчёта энергетических соотношений в линиях передач

Коэффициент полезного действия (КПД) линий передач, согласованной с генератором и не согласованной с нагрузкой определяется по формуле

$$\eta_l = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = 1 + 0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot (K_{0\sigma} + 1/K_{0\sigma})^{-1}, \quad (3.1)$$

где  $P_{ВЫХ}$  и  $P_{ВХ}$  – мощности на входе и на выходе линии передачи,  $\alpha$  – коэффициент затухания дБ/м, а  $l$  – длина линии в метрах.

Коэффициент бегущей волны  $K_{0\sigma}$  определяется через максимальные ( $U_{\max}$ ,  $I_{\max}$ ) и минимальные ( $U_{\min}$ ,  $I_{\min}$ ) значения токов и напряжений

$$K_{0\sigma} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{1 - |\Gamma_H|}{1 + |\Gamma_H|}, \quad (3.2)$$

где  $|\Gamma_H|$  – модуль коэффициента отражения от нагрузки.

При активной нагрузке и  $R_H \geq W_L$  —  $K_{\text{бв}} = \frac{W_L}{R_H}$ , а при  $W_L \geq R_H$  —  $K_{\text{бв}} = \frac{R_H}{W_L}$ . При комплексной нагрузке  $Z_H = R_H - i \cdot X_H$

$$|\Gamma_H| = \sqrt{\frac{(R_H - W_L)^2 + X_H^2}{(R_H + W_L)^2 + X_H^2}}. \quad (3.3)$$

В этом случае КПД

$$\eta_L = \left[ 1 + 0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot \left( \frac{R_H}{W_L} + \frac{W_L}{R_H} + \frac{X_H^2}{R_H \cdot W_L} \right) \right]^{-1}. \quad (3.4)$$

КПД линии согласованной с нагрузкой

$$\eta_L = \frac{P_H}{P_{\text{вх}}} = e^{-0,23\alpha \cdot l} \approx 1 - 0,23\alpha \cdot l, \quad (3.5)$$

где  $P_H$ -мощность, отдаваемая в нагрузку,

$P_{\text{вх}}$ - мощность на входе линии.

Мощность потерь в линии

$$P_n = P_{\text{вх}} - P_H = 0,23P_{\text{вх}} \cdot \alpha \cdot l. \quad (3.6)$$

Распределение напряжения  $U(x)$  и  $I(x)$  вдоль линии без потерь

$$U(x) = U_H \cdot \cos(kx) + i \cdot I_n \cdot W_L \cdot \sin(kx), \quad (3.7)$$

$$I(x) = I_n \cdot \cos(kx) + i \cdot \frac{U_n}{W_L} \cdot \sin(kx), \quad (3.8)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,

$U_n$  и  $I_n$  — амплитуда тока и напряжения на нагрузке,

$x$  — расстояние от конца линии.

В последних выражениях, в случае короткого замыкания (КЗ), принимают  $U_n = 0$ , а в случае холостого хода (ХХ)  $I_n = 0$ . При КЗ получим

$$U(x) = 2U_{\text{max}} \cdot \sin(kx), \quad (3.9)$$

$$I(x) = 2I_{\text{max}} \cdot \cos(kx), \quad (3.10)$$

а при ХХ

$$U(x) = 2U_{\text{max}} \cdot \cos(kx), \quad (3.11)$$

$$I(x) = 2I_{\text{max}} \cdot \sin(kx), \quad (3.12)$$

где  $2U_{\text{max}}$ - напряжение в точках пучности,

$2I_{\text{max}} = 2U_{\text{max}}/W_L$ - ток в этих же точках.

При согласованной нагрузке ( $Z_H = W_L$ ) в линии распространяются чисто бегущие волны

$$U(x) = U_n, \quad (3.13)$$

$$I(x) = U_n/W_L, \quad (3.14)$$

Входное сопротивление линии с потерями

$$Z_{\text{вх}} = W_L \frac{Z_H + i \cdot W_L \cdot \text{th}[(k - i \cdot \alpha)l]}{W_L + i \cdot Z_H \cdot \text{th}[(k - i \cdot \alpha)l]}, \quad (3.15)$$

где  $Z_H = R_H + i \cdot X_H$  - сопротивление нагрузки,

$W_L$  - волновое сопротивление линии,

$\alpha$  - коэффициент затухания [ $\text{м}^{-1}$ ],

$l$  - длина линии,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число.

Для линии без потерь

$$Z_{BX} = W_L \frac{Z_H + i \cdot W_L \cdot \operatorname{tg}(kl)}{W_L + i \cdot Z_H \cdot \operatorname{tg}(kl)}, \quad (3.16)$$

При коротком замыкании  $Z_{BX} = i \cdot W_L \cdot \operatorname{tg}(kl)$ , при холостом ходе  $Z_{BX} = -i \cdot W_L \cdot \operatorname{ctg}(kl)$ , а при согласовании  $Z_{BX} = R_H = W_L$ .

Входное сопротивление четверть волновой линии с небольшими потерями определяется из выражений:

для режима холостого хода

$$Z_{BX} = R_{BX} = R_1 \cdot \lambda / 8, \quad (3.17)$$

и для короткого замыкания

$$Z_{BX} = R_{BX} = 8W_L^2 / (R_1 \cdot \lambda), \quad (3.18)$$

где  $R_1$  - погонное активное сопротивление ЛП.

Добротность в контуре, образованного четверть волновой линией, находится по формуле

$$Q = \frac{27.3}{\alpha \cdot l}. \quad (3.19)$$

3.2 Примеры решения типовых задач расчёта энергетических соотношений в линиях передач

3.2.1. Двухпроводная воздушная ( $\epsilon=1$ ) линия передачи, короткозамкнутая на конце имеет размеры: диаметр проводов  $2r = 4$  мм, расстояние между проводами  $d = 10$  см, длина  $l = 8$  м. Определить амплитуду напряжения на входе линии, если амплитуда тока на конце линии  $2I_{max} = 1,5$  А, а частота питающего генератора  $f = 15$  МГц.

$r = 2$  мм,  $d = 10$  см,  $l = 8$ ,  $2I_{max} = 1,5$  А,  $f = 15$  МГц.  $U_{вх}(l = 8)$  ?

Решение.

1. Вычислим волновое сопротивление  $W_L$  двухпроводной воздушной ( $\epsilon=1$ ) линии передачи

$$W_L = (276 / (\epsilon)^{0.5}) \cdot \lg(d/r) = (276 / (1)^{0.5}) \cdot \lg(10/0,2) = 468,9 \text{ Ом.}$$

2. Вычислим амплитуду напряжения  $2 \cdot U_{max}$

$$2 \cdot U_{max} = 2 \cdot I_{max} \cdot W_L = 1,5 \cdot 468,9 = 703,35 \text{ В.}$$

3. Вычислим коэффициент фазы  $\beta$

$$\beta = 2 \cdot \pi / \lambda = 2 \cdot \pi \cdot f / c = 6,28 \cdot 15 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^8 = 0,314 \text{ рад./м.}$$

4. Вычислим амплитуду напряжения на входе линии

$$U_{вх}(l = 8) = 2 \cdot U_{max} \cdot \sin(\beta \cdot l) = 703,35 \cdot \sin(0,314 \cdot 8) = 414,14 \text{ В.}$$

Ответ  $U_{ex}(l = 8) = 414,14 \text{ В}$ .

3.2.2. Во сколько раз возрастет максимальная амплитуда напряжения на линии, если при неизменной мощности в нагрузке КБВ упадет с 1 до 0,25? Как при этом изменится максимальная амплитуда тока в линии?

Решение:

$$K_{\text{об2}} = \frac{R_{H2}}{W_{\text{Л}}} = 0,25$$

$$P_2 = U_{2\text{max}}^2 / 2R_{H2} = U_{2\text{max}}^2 / [2 \cdot 0,25 \cdot W_{\text{Л}}] \quad P_1 = U_{1\text{max}}^2 / 2W_{\text{Л}}$$

$$1 = P_1 / P_2 = U_{1\text{max}}^2 / 2W_{\text{Л}} / U_{2\text{max}}^2 / [2 \cdot 0,25 \cdot W_{\text{Л}}]$$

$$0,25 = U_{1\text{max}}^2 / U_{2\text{max}}^2 \quad U_{2\text{max}} = 2U_{1\text{max}}$$

Ответ:  $U_{2\text{max}} = 2U_{1\text{max}}$ .

3.2.3. От генератора на вход линии передачи, коротко- замкнутой на конце, подается напряжение  $U_{\text{ВХ}} = 600 \text{ В}$  частотой  $f = 50 \text{ МГц}$ . Определить амплитуды тока и напряжения на расстоянии  $x = 1,3 \text{ м}$  от конца линии, если ее волновое сопротивление  $W_{\text{Л}} = 240 \text{ Ом}$ .

Решение:

$$1. \lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^7 = 6 \text{ м}.$$

При  $x = 1,3 \text{ м}$  и КЗ получим

$$U(x) = 2U_{\text{max}} \cdot \sin(kx) = 600 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) = 600 \cdot \sin\left(\frac{6,28 \cdot 1,3}{6}\right) = 600 \cdot \sin 1,361 =$$

$$600 \cdot 0,978 = 586,8 \text{ В}.$$

$$I(x) = 2I_{\text{max}} \cdot \cos(kx) = \frac{2U_{\text{max}}}{W_{\text{Л}}} \cdot \cos kx = \frac{600}{240} \cdot \cos 1,361 = 2,5 \cdot 0,208 = 0,52 \text{ А}.$$

Ответ:  $I(x) = 0,52 \text{ А}$ .  $U(x) = 586,8 \text{ В}$ .

3.2.4. Напряжение на зажимах генератора, питающего разомкнутую линию передачи длиной  $l = 12 \text{ м}$ , составляет  $U_{\text{ВХ}} = 50 \text{ В}$ . Найти напряжение на конце линии, если частота генератора  $f = 10 \text{ МГц}$ .

Решение:

$$U(x) = U_{\text{H}} \cdot \cos(kx).$$

$$kx = 2\pi \cdot x / \lambda = 2\pi \cdot x \cdot f / c = 6,28 \cdot 12 \cdot 10^7 / 3 \cdot 10^8 = 2,512.$$

$$U_{\text{H}} = U(x) / \cos(kx) = 50 / \cos 2,512 = -50 / 0,808 = -61,8 \text{ В}.$$

Ответ:  $U_{\text{H}} = -61,8 \text{ В}$ .

3.2.5. Линия передачи нагружена на активное сопротивление, больше волнового. Определить величину напряжения на нагрузке, если минимальный ток в линии  $I_{\text{мин}} = 0,4 \text{ А}$ , максимальный ток  $I_{\text{max}} = 0,64 \text{ А}$ , а напряжение на расстоянии  $x = \lambda / 4$  от нагрузки  $U(x) = 500 \text{ В}$ .

Решение:

$$K_{\text{об}} = \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} = 0,4/0,64 = 0,625.$$

$$U(x) = U_H \cdot \cos(kx) + i \cdot I_H \cdot W_L \cdot \sin(kx) = U_H \cos(2\pi \cdot \lambda / 4 \lambda) +$$

$$+ i I_H W_L \sin(2\pi \cdot \lambda / 4 \lambda) = 0 + i I_H W_L = 500 \text{ В.}$$

$$I_H W_L = I_H R_H K_{\text{об}} = 500 \text{ В.}$$

$$\text{При активной нагрузке и } R_H \geq W_L \text{ — } K_{\text{об}} = \frac{W_L}{R_H},$$

$$R_H = 500 / (I_H K_{\text{об}}).$$

$$U_H = I_H R_H = I_H 500 / (I_H K_{\text{об}}) = 500 / K_{\text{об}} = 500 / 0,625 = 800 \text{ В.}$$

$$\text{Ответ: } U_H = 800 \text{ В.}$$

3.2.6. Двухпроводная воздушная ( $\varepsilon = 1$ ) линия передачи, разомкнутая на конце, имеет размеры: диаметр проводов  $2r = 4$  мм, расстояние между проводами  $d = 16$  мм, длина  $l = 8$  м. Генератор, питающий линию, работает на частоте  $f = 15$  МГц. Определить напряжение и ток на входе линии, если на расстоянии  $x = 1,7$  м от ее конца амплитуда напряжения  $U(x) = 42$  В.  
Решение:

Для  $x = 1,7$  м

$$kx = 2\pi \cdot x / \lambda = 2\pi \cdot x f / c = 6,28 \cdot 1,7 \cdot 1,5 \cdot 10^7 / 3 \cdot 10^8 = 0,5338.$$

$$U_H = U(x) / 2 \cos(kx) = 42 / 2 \cos 0,5338 = 42 / 2 \cdot 0,861 = 24,4 \text{ В.}$$

$$W_L, \text{ Ом} = \frac{276}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \lg d/r = \frac{276}{\sqrt{1}} \cdot \lg 16/2 = 276 \cdot 0,903 = 249,25 \text{ Ом.}$$

$$I = U_H / W_L = 24,4 / 249,25 = 0,098 \text{ А.}$$

Для  $x = l = 8$  м

$$kl = 0,314 \cdot 8 = 2,512.$$

$$U(l) = U_H \cos(kl) = 24,4 \cdot 2 \cos 2,512 = -24,4 \cdot 2 \cdot 0,81 = -28,35 \text{ В.}$$

$$\text{Ответ: } I = 0,098 \text{ А. } U(l) = -28,35 \text{ В.}$$

3.2.7. Линия передачи без потерь нагружена на активное сопротивление  $R_H = 400$  Ом, равное волновому, и питается от генератора синусоидальных колебаний. Внутреннее сопротивление генератора  $R_G = 600$  Ом, ЭДС имеет амплитуду  $\mathcal{E}_G = 100$  В. Определить напряжение на зажимах генератора и мощность, выделяемую на нагрузке.

Решение:

$$R = R_H + R_G = 400 + 600 = 1000 \text{ Ом.}$$

$$I = \mathcal{E}_G / R = 100 / 1000 = 0,1 \text{ А.}$$

$$U_G = \mathcal{E}_G - I R_G = 100 - 0,1 \cdot 600 = 40 \text{ В.}$$

$$P = U_G^2 / (2 \cdot R_H) = 40^2 / (2 \cdot 400) = 2 \text{ Вт.}$$

$$\text{Ответ: } U_G = 40 \text{ В. } P = 2 \text{ Вт.}$$

3.2.8. Линия передачи нагружена на активное сопротивление  $R_H = 90$  Ом. Каким должно быть волновое сопротивление линии, чтобы КБВ в линии был равен 0,75?

Решение:

При активной нагрузке и  $R_H \geq W_l$  —  $K_{\text{об}} = \frac{W_l}{R_H}$ , а при  $W_l \geq R_H$

$$- K_{\text{об}} = \frac{R_H}{W_l}.$$

При активной нагрузке и  $R_H \geq W_l$  имеем:

$$W_l = K_{\text{об}} \cdot R_H = 90 \cdot 0,75 = 67,5 \text{ Ом.}$$

При активной нагрузке и  $W_l \geq R_H$  имеем:

$$W_l = R_H / K_{\text{об}} = 90 / 0,75 = 120 \text{ Ом.}$$

Ответ: при  $R_H \geq W_l$   $W_l = 67,5$  Ом, а при  $W_l \geq R_H$   $W_l = 120$  Ом.

3.2.9. При каком активном нагрузочном сопротивлении КПД линии длиной  $l = 300$  м, с коэффициентом затухания  $\alpha = 2,61$  дБ/км и с волновым сопротивлением  $W_l = 650$  Ом, будет равен: а) 0,8; б) 0?

Решение:

1. Коэффициент полезного действия (КПД) линий передач, согласованной с генератором и не согласованной с нагрузкой определяется по формуле

$$\eta_l = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = 1 + 0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot (K_{\text{об}} + 1/K_{\text{об}})^{-1},$$

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  и  $P_{\text{ВХ}}$  — мощности на входе и на выходе линии передачи,  $\alpha$  — коэффициент затухания дБ/м, а  $l$  — длина линии в метрах.

Коэффициент бегущей волны  $K_{\text{об}}$ . Учтём, что при активной нагрузке и  $R_H \geq W_l$  —  $K_{\text{об}} = \frac{W_l}{R_H}$ , а при  $W_l \geq R_H$  —  $K_{\text{об}} = \frac{R_H}{W_l}$ .

При  $K_{\text{об}} = 0,8$  получим:

$$1 - \eta_l = 0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot \eta_l \left( \frac{W_l}{R_H} + \frac{R_H}{W_l} \right) \text{ и } \frac{W_l^2 + R_H^2}{W_l \cdot R_H} = \frac{1 - \eta_l}{0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot \eta_l}.$$

$$W_l^2 + R_H^2 = \frac{1 - \eta_l \cdot W_l \cdot R_H}{0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot \eta_l} = \frac{1 - 0,8 \cdot 650 \cdot R_H}{0,115 \cdot 2,61 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 0,8} = 1804,65 \cdot R_H.$$

$$R_H^2 - 1804,65 \cdot R_H + 650^2 = 0. \quad R_{H1} = 280 \text{ Ом}, \quad R_{H2} = 1500 \text{ Ом.}$$

Тогда при  $\eta_l = 0$  получим:  $W_l^2 + R_H^2 = \frac{1 - \eta_l \cdot W_l \cdot R_H}{0,115 \cdot \alpha \cdot l \cdot 0} = \infty. \quad R_H = \infty.$

Ответ: при  $\eta_n=0,8$   $R_{H1}=280$  Ом,  $R_{H2}=1500$  Ом, а при  $\eta_n=0$   $R_H = \infty$ .

### 3.3 Задачи для самостоятельной работы

3.3.1. Двухпроводная воздушная ( $\varepsilon=1$ ) линия передачи, короткозамкнутая на конце имеет размеры: диаметр проводов  $2r$  мм, расстояние между проводами  $d$  см, длина  $l$  м. Определить амплитуду напряжения на входе линии, если амплитуда тока на конце линии  $2I_{max}=2,5$  А, а частота питающего генератора  $f=12$  МГц. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.17 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.17

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$2r$ , мм	4,4	3,7	3,6	3,9	4,8	4,1	3,6	3,4	3,7	4,2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , см	10,1	11,2	10,3	9,7	9,8	11,1	9,2	9,3	11,3	9,8
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l$ , м	11	12	13	9	9,85	9,5	11,5	11,2	10,3	8,9

3.3.2. От генератора на вход линии передачи, короткозамкнутой на конце, подается напряжение  $U_{ВХ} = 500$  В частотой  $f$  МГц. Определить амплитуды тока и напряжения на расстоянии  $x$  м от конца линии, если ее волновое сопротивление  $W_{л}$  Ом. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.18 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.18

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$f$ МГц	60	55	50	65	70	66	68	54	75	48
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x$ , м	1,25	1,15	1,28	1,3	1,35	1,32	1,38	1,25	1,17	1,25
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_l$ Ом	210	220	230	300	280	310	225	235	270	280

3.3.3. Напряжение на зажимах генератора, питающего разомкнутую линию передачи длиной  $l$  м, составляет  $U_{BX}$  В. Найти напряжение на конце линии, если частота генератора  $f$  МГц. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.19 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.19

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$f$ , МГц	13,0	13,5	13,2	12,5	11,5	12,8	11,7	12,5	12,8	13,0
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l$ , м	12,5	11,5	12,8	13,0	13,5	13,2	13,8	12,5	11,7	12,5
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{BX}$ , В	60	55	50	65	70	66	68	54	75	48

3.3.4. Линия передачи нагружена на активное сопротивление, больше волнового. Определить величину напряжения на нагрузке, если минимальный ток в линии  $I_{min}$  А, максимальный ток  $I_{max}$  А, а напряжение на расстоянии  $x = \lambda / 4$  от нагрузки  $U(x)$  В. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.20 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.20

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$I_{\min}$ А	0,42	0,44	0,46	0,43	0,38	0,37	0,36	0,43	0,44	0,39
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\max}$ А	0,64	0,68	0,65	0,62	0,63	0,46	0,58	0,6	0,57	0,55
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U(x)$ В	600	550	500	650	700	660	680	540	750	480

3.3.5. Двухпроводная воздушная ( $\varepsilon = 1$ ) линия передачи, разомкнутая на конце, имеет размеры: диаметр проводов  $2r$ , мм, расстояние между проводами  $d$  мм, длина  $l = 8$  м. Генератор, питающий линию, работает на частоте  $f = 12$  МГц. Определить напряжение и ток на входе линии, если на расстоянии  $x$  м от ее конца амплитуда напряжения  $U(x) = 50$  В. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.21 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.21

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$2r$ , мм	4,2	4,4	4,6	4,3	3,8	3,7	3,6	4,3	4,4	3,9
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x$ , м	1,25	1,35	1,28	1,4	1,55	1,62	1,58	1,65	1,47	1,55
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	15,0	13,5	16,2	15,5	14,5	15,8	16,7	15,5	16,8	16,0

3.3.6. Линия передачи без потерь нагружена на активное сопротивление  $R_H$  Ом, равное волновому, и питается от генератора синусоидальных колебаний. Внутреннее сопротивление генератора  $R_G$  Ом, ЭДС имеет амплитуду  $\mathcal{E}_G$  В. Определить напряжение на зажимах генератора и мощность, выделяемую на нагрузке. Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем.

давателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.22 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.22

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_H, \text{ Ом}$	420	440	460	430	380	370	360	430	440	390
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_G, \text{ Ом}$	600	550	500	650	700	660	680	540	750	480
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mathcal{E}_G, \text{ В}$	150	135	162	155	145	158	167	155	168	160

3.3.7. При каком активном нагрузочном сопротивлении КПД линии длиной  $l = 200$  м, с коэффициентом затухания  $\alpha$  дБ/км и с волновым сопротивлением  $W_l$  Ом, будет равен:  $K$ . Вариант задания для этой задачи назначается преподавателем, и состоит из трёх цифр. Ниже приведена таблица 2.23 с исходными данными согласно варианту задания.

Таблица 2.23

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\alpha, \text{ дБ/км}$	2,25	2,35	2,68	2,43	2,55	2,42	2,58	2,65	2,57	2,75
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_l, \text{ Ом}$	600	550	500	650	700	660	680	540	750	480
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K$	0,82	0,64	0,76	0,53	0,68	0,77	0,86	0,73	0,64	0,59

**СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ.-М.: Высшая школа, 1998.
- 2 Хмель В.Ф. Антенны и устройства СВЧ. Сборник задач. – Киев: Высшая школа, 1976.
- 3 Справочник по элементам электронных устройств. Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. - М.: Энергия, 1977.
- 4 Конструкции СВЧ- устройств и экранов. Под ред. А.М. Чернушенко, - М.: Радио и связь, 1983.
- 5 Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1.-М.: Высшая школа,1970.
- 6 Фельдштейн А.П., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники.-М.:Сов.Радио,1967.
- 7 Сборник задач по курсу Электродинамика и распространение радиоволн. Под. ред. С.Н. Баскакова.-М.: Высшая школа, 1981.
- 8 Корогодов В. С. Техническая электродинамика. Сборник задач. - Томск: ТУСУР, 2001.
- 9 Теория линий передачи сверхвысоких частот. Пер. с англ. под ред. А. И. Шпунтова. - М.:Сов.Радио,1951.
- 10 Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992.