

Федеральное агентство связи

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Кафедра электродинамики и антенн

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Методические указания и индивидуальные задания
для студентов дневной формы обучения

Авторы-составители:

к.т.н., доцент Маслов М.Ю.

доцент, к.т.н. Ружников В.А.

ассистент Скачков Д.В.

ассистент Требунская Д.А.

Самара, 2011

УДК 537.87

**Маслов Михаил Юрьевич, Ружников Вадим Александрович,
Скачков Дмитрий Владимирович, Требунская Дарья Алексеевна**

Индивидуальное задание по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн» и методические указания по его выполнению.

Содержание

Введение	4
Список литературы	4
Содержание индивидуального задания.....	5
Задание 1	5
Задание 2.....	5
Задание 3.....	6
Задание 4.....	7
Методические указания к выполнению индивидуального задания	9
Требования по оформлению пояснительной записки	17
Приложение 1	19
Приложение 2	20
Приложение 3	21

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания и индивидуальные задания предназначены для студентов дневной формы обучения.

Индивидуальное задание составлено для 100 вариантов. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:

m - предпоследняя, **n** - последняя.

Целью выполнения индивидуального задания является:

– систематизация, закрепление и расширение теоретических знаний по дисциплине;

– развитие навыков самостоятельной работы с научно-технической и справочной литературой по теории электромагнитного поля и технике СВЧ устройств.

Перед выполнением индивидуального задания студенту рекомендуется ознакомиться с требованиями данных методических указаний. В процессе выполнения студент может пользоваться не только рекомендованной, но и любой другой доступной ему учебной и технической литературой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная:

1. Пименов, Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов - М.: Радио и связь, 2002. – 536 с.

2. Петров, Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для вузов / Б. М. Петров.- 2-е изд., испр.- М.: Горячая линия - Телеком, 2007.- 558 с.

Дополнительная:

3. Семенов, Н.А. Техническая электродинамика: учеб. пособие для вузов / Н.А. Семенов - М.: Связь, 1973. – 480 с.

4. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – 3-е изд., перераб. и доп.. – М.: Наука, 1989. – 544 с.

5. Лебедев, И.В. Техника и приборы на СВЧ / И.В. Лебедев - Т.1. М.,: Мир, 1977. – 440 с.

СОДЕРЖАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Задание 1

Известен закон изменения одного из векторов электромагнитного поля в воздухе:

$$\vec{E} = \vec{\zeta}_0 E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \text{ – для чётных номеров } m,$$

$$\vec{H} = \vec{\zeta}_0 H_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \text{ – для нечётных номеров } m.$$

Требуется определить второй вектор электромагнитного поля (\vec{H} - для чётных номеров m и \vec{E} для нечётных номеров m), мгновенное и среднее значения вектора Пойнтинга.

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_0 , мВ/м	5		15		8		10		3	
H_0 , мкА/м		1,5		3		1		2,5		5
$\vec{\zeta}_0$	\vec{x}_0	\vec{y}_0	$\vec{\theta}_0$	$\vec{\varphi}_0$	\vec{x}_0	\vec{y}_0	$\vec{\theta}_0$	$\vec{\varphi}_0$	\vec{x}_0	\vec{y}_0

Примечание: если согласно выбранному варианту, орт-вектор $\vec{\zeta}_0$ равен $\vec{\theta}_0$, то при решении задачи считать, что задана сферическая, для $\vec{\varphi}_0$ – цилиндрическая системы координат.

Таблица 1.2

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α , м ⁻¹	2	5	15	10	3	1,2	3,2	8	5	1,3
β , м ⁻¹	30	10	25	40	80	25	75	50	90	45
f , МГц	1	10	5	3	20	7	9	5	30	15

Задание 2

По проводникам коаксиального волновода (рис.1) протекает постоянный ток I (табл.2.1). Размеры коаксиального волновода R_1 , R_2 и R_3 для различных вариантов задания приведены в табл. 2.2. Проводники коаксиального волновода выполнены из меди. Пространство между внутренним и внешним проводниками заполнено полиэтиленом.

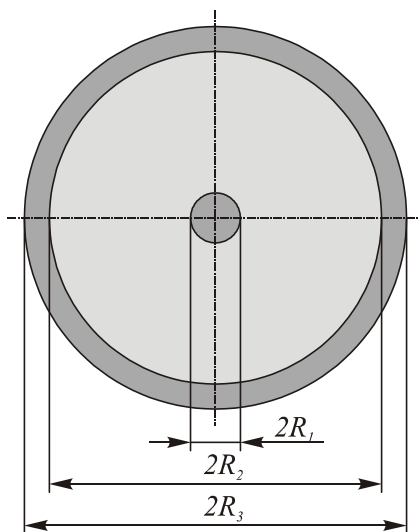


Рис. 1

1. Вывести закон, выражающий зависимость напряжённости магнитного поля от расстояния от центра волновода.

2. Найти векторы напряжённости

магнитного поля и магнитной индукции на расстояниях r_1, r_2, r_3, r_4 от центра волновода ($r_1 = 0,5 R_1, r_2 = (R_1+R_2)/2, r_3 = (R_2+ R_3)/2, r_4 = 2 R_3$).

3. Построить график зависимости напряженности магнитного поля от расстояния.

Таблица 2.1

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I, \text{мА}$	8	5	6	5	9	15	7	8	3	5

Таблица 2.2

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, \text{мм}$	2	1	3	4	6	9	2	4	1	2
$R_2, \text{мм}$	7	5	8	9	18	25	5	10	4	6
$R_3, \text{мм}$	8	6	9	10	19	26	6	11	5	7

Примечание: при решении задачи считать, что в каждый момент времени токи во внутреннем и внешнем проводниках волновода в одном поперечном сечении противоположны, и равномерно распределены по поперечным сечениям проводников.

Задание 3

В волноводе прямоугольного сечения (табл. 3.1) распространяется волна основного типа. Стенки волновода выполнены из материала, указанного в таблице 3.2.

Требуется:

- 1) определить частотные границы одноволнового режима;
- 2) определить частоту f_{\min} , соответствующую минимальному коэффициенту ослабления α_{\min} в заданном волноводе;
- 3) для частоты, соответствующей $f = t \cdot f_{\text{кр}}^{H_{10}}$, определить основные параметры: $\tilde{\gamma} = \alpha + i\beta, \lambda, \Lambda, v_{\phi}, v_{\text{гр}}, Z_c^{H_{10}}$;
- 4) изобразить структуру поля в поперечном и продольном сечениях волновода;
- 5) определить, какие типы волн могут распространяться в заданном прямоугольном волноводе на частоте $f = 1,5 \cdot t \cdot f_{\text{кр}}^{H_{10}}$

Таблица 3.1

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ширина волновода, $a, \text{мм}$	72,14	58,17	74,55	49,39	34,85	28,5	22,86	19	15,8	12,9
Высота волновода, $b, \text{мм}$	34,04	29,08	22,15	20,2	15,8	12,6	10,16	9,5	7,9	6,5

Таблица 3.2

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Материал стенок	медь	латунь	серебро	алюминий	латунь	серебро	медь	алюминий	Латунь	медь
t	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7

Задание 4

Таблица 4.1

n	Условие задачи
0	<p>Найти распределение амплитуд и мощностей волн по плечам волноводного E-тройника при подаче в одно из боковых плеч (2 или 3) 100 Вт, если в плоскости отсчёта E-плеча имеет место режим:</p> <p><u>четные m</u> - короткозамкнутый поршень находится в плоскости отсчёта $l = 0$. Свободное плечо нагружено на согласованную нагрузку.</p> <p><u>нечетные m</u> - короткозамкнутый поршень смещён на произвольное расстояние l относительно плоскости отсчёта E-плеча. Свободное плечо нагружено на согласованную нагрузку.</p>
1	<p>Используя матрицу рассеяния, показать, в какие плечи волноводного кольцевого моста следует включать выходы передатчиков, для работы на общую антенну, в случае:</p> <p><u>четные m</u> - синфазного возбуждения волн в плоскости отсчёта плеч.</p> <p><u>нечетные m</u> - противофазного возбуждения волн в плоскости отсчёта плеч.</p> <p>Мощности обоих передатчиков равны 50 Вт.</p>
2	<p>Найти распределение амплитуд и мощностей волн по плечам волноводного H-тройника при подаче в одно из боковых плеч (1 или 2) 10 Вт, если в плоскости отсчёта H-плеча имеет место режим:</p> <p><u>четные m</u> - эквивалентного холостого хода.</p> <p><u>нечетные m</u> - короткозамкнутый поршень смещён на произвольное расстояние l от плоскости отсчёта.</p> <p>Свободное плечо нагружено на согласованную нагрузку.</p>

Таблица 4.1 (продолжение)

<i>n</i>	Условие задачи
3	Найти распределение мощностей по плечам щелевого волноводного моста при подаче 1 Вт: <u>четные m</u> – в плечо 1, <u>нечетные m</u> – в плечо 3.
4	Используя матрицу рассеяния, показать, при каком соотношении нагрузок боковых плеч двойного волноводного тройника (приведённых к плоскости отсчёта) энергия электромагнитной волны, подводимой к: <u>четные m</u> - H -плечу не проходит в E -плечо. К H -плечу подводится мощность 1 Вт. <u>нечетные m</u> - E -плечу максимально проходит в H -плечо. К E - плечу подводится мощность 1 Вт.
5	Используя матрицу рассеяния, показать, при каком соотношении нагрузок боковых плеч двойного волноводного тройника (приведённых к плоскости отсчёта) энергия электромагнитной волны, подводимой к: <u>четные m</u> - H -плечу не проходит в E -плечо. К H -плечу подводится мощность 100 Вт. <u>нечетные m</u> - E -плечу максимально проходит в H -плечо. К E -плечу подводится мощность 100 Вт.
6	Найти распределение мощностей по плечам щелевого волноводного моста при подаче 50 Вт: <u>четные m</u> – в плечо 1; <u>нечетные m</u> – в плечо 3.
7	Используя матрицу рассеяния, показать, в какие плечи волноводного кольцевого моста следует включать выходы передатчиков, для работы на общую антенну, в случае: <u>четные m</u> - синфазного возбуждения волн в плоскости отсчёта плеч. <u>нечетные m</u> - противофазного возбуждения волн в плоскости отсчёта плеч. Мощности обоих передатчиков равны 20 Вт.
8	Найти распределение амплитуд и мощностей волн по плечам волноводного H -тройника при подаче в одно из боковых плеч (1 или 2) 100 Вт, если в плоскости отсчёта H -плеча имеет место режим: <u>четные m</u> - эквивалентного холостого хода. <u>нечетные m</u> - короткозамкнутый поршень смещён на произвольное расстояние l от плоскости отсчёта. Свободное плечо нагружено на согласованную нагрузку.

Таблица 4.1 (продолжение)

<i>n</i>	Условие задачи
9	<p>Найти распределение амплитуд и мощностей волн по плечам волноводного <i>E</i>-тройника при подаче в одно из боковых плеч (2 или 3) 10 Вт, если в плоскости отсчёта <i>E</i>-плеча имеет место режим:</p> <p><u>четные <i>m</i></u> - короткозамкнутый поршень находится в плоскости отсчёта $l = 0$.</p> <p><u>нечетные <i>m</i></u> - короткозамкнутый поршень смещён на произвольное расстояние l относительно плоскости отсчёта <i>E</i>-плеча.</p> <p>Свободное плечо нагружено на согласованную нагрузку.</p>

Примечание: матрицы рассеяния для СВЧ-устройств приведены в Приложении 3.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Методические указания к заданию №1

Пусть по условию задачи требуется определить вектор напряженности магнитного поля в воздухе, а также мгновенное и среднее значения вектора Пойнтинга, если вектор напряженности электрического поля изменяется по закону:

$$\vec{E} = \vec{x}_0 E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z). \quad (1)$$

1. Для нахождения вектора напряженности магнитного поля воспользуемся вторым уравнением Максвелла в дифференциальной форме:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2)$$

2. Учитывая, что в воздухе векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции связаны соотношением $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, перепишем (2) в виде:

$$\text{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

3. Вектор напряженности электрического поля представляет собой гармоническую функцию времени, поэтому в уравнении (3) целесообразно перейти к комплексным амплитудам:

$$\text{rot} \dot{\vec{E}}_m = -i \omega \mu_0 \dot{\vec{H}}_m \quad (4)$$

Запишем комплексную амплитуду вектора напряженности электрического поля:

$$\dot{\vec{E}}_m = \vec{x}_0 E_{m0} e^{-i\beta z} \quad (5)$$

4. Ротор комплексного вектора (5), в декартовых координатах может быть выражен через символический определитель [Приложение 1]:

$$\text{rot } \dot{\vec{E}}_m = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \dot{E}_{mx} & \dot{E}_{my} & \dot{E}_{mz} \end{vmatrix} \quad (6)$$

5. Выразим из (4) комплексную амплитуду вектора напряжённости магнитного поля:

$$\dot{\vec{H}}_m = \frac{i}{\omega\mu_0} \text{rot } \dot{\vec{E}}_m \quad (7)$$

$$\dot{\vec{H}}_m = \vec{y}_0 \frac{-i}{\omega\mu_0} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} E_0 e^{-\alpha z} e^{-i\left(\beta z - \arctg \frac{\beta}{\alpha}\right)} \quad (8)$$

Найдём мгновенное значение вектора напряжённости магнитного поля:

$$\vec{H} = \vec{y}_0 \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\omega\mu_0} E_0 e^{-\alpha z} \cos\left(\omega t - \beta z + \arctg \frac{\beta}{\alpha} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

Найдём и подставим в (9) числовые значения амплитуды напряжённости магнитного поля в начале координат, и начальную фазу.

Для нахождения мгновенного значения вектора Пойнтинга необходимо воспользоваться определением [1] $\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}$, подставив (9) и (1).

Запишем выражение для мгновенного значения вектора Пойнтинга с учётом амплитуды и начальных фаз:

$$\vec{\Pi} = \vec{z}_0 \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\omega\mu_0} E_0^2 e^{-2\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \cos\left(\omega t - \beta z + \arctg \frac{\beta}{\alpha} - \frac{\pi}{2}\right). \quad (10)$$

Найдём среднее за период значение вектора Пойнтинга:

$$\vec{\Pi}_{cp} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\dot{\vec{E}}_m \times \dot{\vec{H}}_m^* \right]. \quad (11)$$

Методические указания к заданию №2

Для нахождения вектора напряжённости магнитного поля необходимо ввести цилиндрическую систему координат, с осью аппликат направленной вдоль продольной оси волновода.

Из соображений симметрии, очевидно, что напряжённость магнитного поля имеет отличную от нуля азимутальную компоненту, модуль которой зависит лишь от расстояния от оси волновода, т.е.:

$$\vec{H} = \vec{\varphi}_0 H(r) \quad (12)$$

Воспользуемся первым уравнением Максвелла в интегральной форме, которое в стационарном случае имеет вид [2]:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I \quad (13)$$

Векторный элемент дуги в подынтегральном выражении в левой части (13) совпадает по направлению с азимутальным ортом:

$$d\vec{l} = \vec{\varphi}_0 dl \quad (14)$$

Ввиду того, что скалярное произведение $\vec{\varphi}_0 \cdot \vec{\varphi}_0 = 1$, интеграл в левой части (13) может быть найден для произвольного кругового контура, концентричного с волноводом:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = H \int_0^{2\pi} r d\varphi = 2\pi r H \quad (15)$$

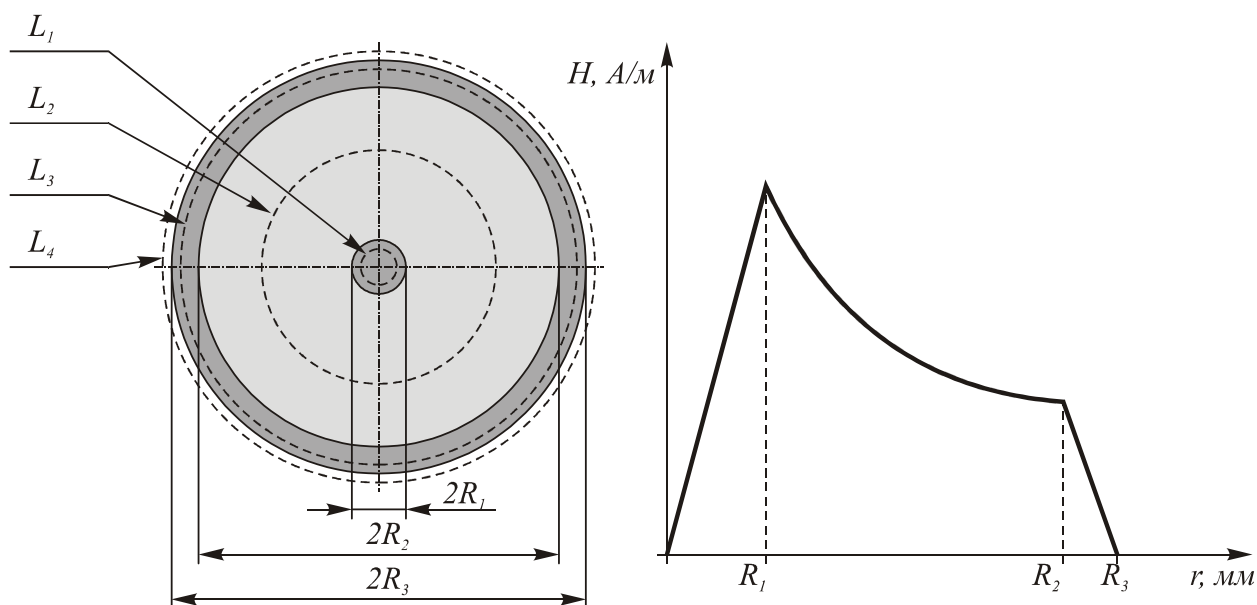


Рис. 2.

Левая часть (13) для различных круговых контуров L (рис. 2), центр которых лежит на оси волновода, неизменно имеет вид (13), в правую же часть необходимо подставлять ток проводимости, охваченный соответствующим контуром. При составлении уравнений следует учесть, что контур L_3 обхватывает полностью ток I , текущий на нас и часть тока текущего от нас.

Результатом будут законы изменения $H(r)$ для четырех областей коаксиального волновода, по которым требуется построить график (рис. 2).

Методические указания к заданию №3

1. Волной основного типа прямоугольного волновода является волна H_{10} . Критическая длина волны для волны типа mn может быть найдена:

$$\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (16)$$

Критическая частота в случае воздушного заполнения волновода:

$$f_{кр}^{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (17)$$

Критические длины волн и критические частоты для различных мод:

$$\lambda_{кр}^{H_{10}} = 2a, \quad f_{кр}^{H_{10}} = \frac{c}{2a}; \quad (18)$$

$$\lambda_{кр}^{H_{20}} = a, \quad f_{кр}^{H_{20}} = \frac{c}{a}, \quad (19)$$

$$\lambda_{кр}^{H_{01}} = 2b, \quad f_{кр}^{H_{01}} = \frac{c}{2b} \quad (20)$$

$$\lambda_{кр}^{E_{11}, H_{11}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}}, \quad f_{кр}^{E_{11}, H_{11}} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \quad (21)$$

Волной первого высшего типа в прямоугольном волноводе является волна H_{20} , поэтому условия одноволнового режима имеют вид:

$$\lambda_{кр}^{H_{20}} < \lambda < \lambda_{кр}^{H_{10}}; \quad (22)$$

$$f_{кр}^{H_{10}} < f < f_{кр}^{H_{20}} \quad (23)$$

2. Коэффициент ослабление в трубчатых волноводах складывается из коэффициента ослабления в металлических стенках и коэффициента ослабления в диэлектрике:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d \quad (24)$$

Ослаблением в диэлектрике можно пренебречь.

Коэффициент ослабления в металле, для волны основного типа может быть вычислен по формуле [1]:

$$\alpha_m^{H_{10}} = \frac{R_s}{bZ_c} \cdot \frac{1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (25)$$

где $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \mu}{\sigma}}$ - поверхностное сопротивление, $Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ Ом.

Пример графика зависимости $\alpha_m^{H_{10}}$ от частоты приведён на рис. 3.

Видно, что минимальный коэффициент ослабления на графике имеет место на частоте $f_{\min} = 15,3$ ГГц.

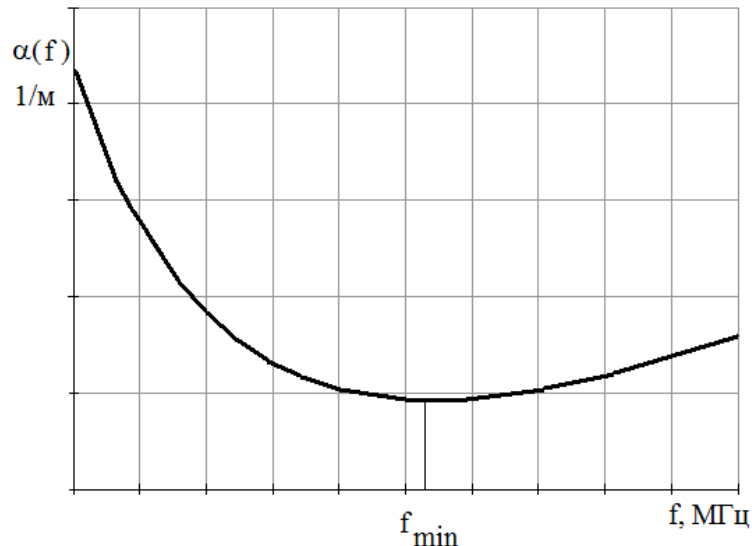


Рис. 3

3. Для частоты $f = t \cdot f_{кр}^{H_{10}}$, определим параметры основной волны:

Коэффициент фазы:

$$\beta^{H_{10}} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (26)$$

Длина волны:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (27)$$

Длина волны в волноводе:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (28)$$

Фазовая скорость:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (29)$$

Скорость переноса энергии:

$$v_e = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (30)$$

Характеристическое сопротивление:

$$Z_c^{H_{10}} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (31)$$

4. Для определения типов волн, которые могут распространяться в волноводе на частоте $f = 1,5 \cdot t \cdot f_{кр}^{H_{10}}$. Требуется проверить, выполняется ли условие распространения $\lambda < \lambda_{кр}$ для волн $H_{10}, H_{20}, H_{01}, H_{02}, H_{11}$ и т.д.

Методические указания к заданию №4

1. Для решения задачи необходимо изучить разделы в рекомендованной литературе, посвященные матричному описанию СВЧ устройств. К примеру, 12.3 в [1] и 7.8 в [5].

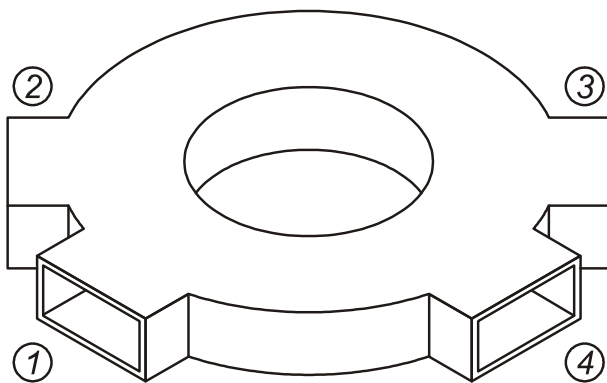


Рис. 4.

2. Далее требуется привести описание СВЧ устройства. К примеру, внешний вид волноводного кольцевого моста приведён на рис. 4. Данный мост представляет собой свёрнутый в кольцо прямоугольный волновод, к которому, либо в плоскости Е, либо в плоскости Н подключены четыре ответвления.

3. Распределение мощностей по плечам моста проводится при помощи матричного метода. Этот метод применяется для анализа и расчёта сложных волноводных узлов, схемой замещения которых может являться эквивалентный линейный многополюсник.

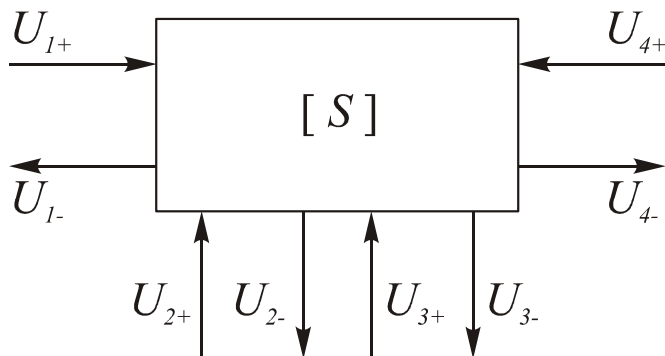


Рис. 5

Режим работы эквивалентного многополюсника описывается набором параметров, объединённых в матрицу. В теории многополюсников СВЧ в основном используют волновые матрицы рассеяния $[S]$ и передачи $[T]$. Математический аппарат матриц позволяет описывать рабочие режимы многополюсника при

помощи систем алгебраических уравнений.

На рис. 5 показаны направления падающих \dot{U}^+ и рассеянных \dot{U}^- многополюсником нормированных волн в каждом его плече.

4. Записывается матрица рассеяния СВЧ устройства (матрицы рассеяния различных СВЧ-устройств приведены в Приложении 2 настоящего пособия). К примеру, для волноводного кольцевого моста, изображенного на рис. 4.

$$[S] = -\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Компоненты матрицы (40): S_{ii} – коэффициент отражения от i -го входа при согласованных выходах, S_{ki} – коэффициент отражения от i -го плеча в k -е.

5. Составляется система уравнений эквивалентного многополюсника с учётом матрицы, записанной на предыдущем шаге. Рекомендуется воспользоваться общими выражениями, приведенными в [2]. Пример системы для волноводного кольцевого моста, изображенного на рис. 4:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1^- &= 0 \cdot \dot{U}_1^+ - \frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_2^+ + 0 \cdot \dot{U}_3^+ - \frac{i}{\sqrt{2}} \dot{U}_4^+, \\ \dot{U}_2^- &= -\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_1^+ + 0 \cdot \dot{U}_2^+ + \frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_3^+ + 0 \cdot \dot{U}_4^+, \\ \dot{U}_3^- &= 0 \cdot \dot{U}_1^+ + \frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_2^+ + 0 \cdot \dot{U}_3^+ - \frac{i}{\sqrt{2}} \dot{U}_4^+, \\ \dot{U}_4^- &= -\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_1^+ + 0 \cdot \dot{U}_2^+ - \frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \dot{U}_3^+ + 0 \cdot \dot{U}_4^+. \end{aligned} \tag{32}$$

6. Для решения системы уравнений, составленной в п.5 необходимо определить начальные условия.

Рассмотрим пример для волноводного кольцевого моста, изображенного на рис. 4. Пусть по условию задачи необходимо показать, в какие плечи волноводного кольцевого моста следует включать выходы передатчиков, для работы на общую антенну, в случае противофазного возбуждения волн в плоскости отсчёта плеч.

Пусть мощности подаются в плечи 1 и 3 со сдвигом по фазе на 180° , плечи 2 и 4 согласованы и одному из них подключена антенна, тогда:

$$\dot{U}_1^+ = -\dot{U}_3^+ = \sqrt{P}, \quad \dot{U}_2^+ = 0, \quad \dot{U}_4^+ = 0.$$

Полученные начальные условия подставляются в систему уравнений,

записанные в п.5. Для волноводного кольцевого моста подставим $\dot{U}_1^+, \dot{U}_2^+, \dot{U}_3^+$ и \dot{U}_4^+ в систему (32) и решим её относительно неизвестных $\dot{U}_1^-, \dot{U}_2^-, \dot{U}_3^-$ и \dot{U}_4^- :

$$\begin{aligned}\dot{U}_1^- &= -\frac{i}{\sqrt{2}}\dot{U}_4^+ = 0, \\ \dot{U}_2^- &= -\frac{i\sqrt{P}}{\sqrt{2}} - \frac{i\sqrt{P}}{\sqrt{2}} = \frac{2i\sqrt{P}}{\sqrt{2}}, \\ \dot{U}_3^- &= -\frac{i}{\sqrt{2}}\dot{U}_4^+ = 0, \\ \dot{U}_4^- &= -\frac{i\sqrt{P}}{\sqrt{2}} + \frac{i\sqrt{P}}{\sqrt{2}} = 0.\end{aligned}$$

Найдём мощности на выходе всех плеч кольцевого моста:

$$\begin{aligned}P_1^- &= |\dot{U}_1^-|^2 = 0 \text{ Вт}, \\ P_2^- &= |\dot{U}_2^-|^2 = 2P \text{ Вт}, \\ P_3^- &= |\dot{U}_3^-|^2 = 0 \text{ Вт}, \\ P_4^- &= |\dot{U}_4^-|^2 = 0 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Для проверки правильности расчёта составим и вычислим баланс мощностей:

$$P_2^- = P_1^+ + P_3^+ = P + P = 2P \text{ Вт}.$$

Баланс мощностей выполняется.

7. Необходимо сделать вывод о работе СВЧ устройства в соответствии с заданием.

Пример для волноводного кольцевого моста, который используется для подключения выходов передатчиков для работы на общую антенну: при равноамплитудном и противофазном возбуждении плеч 1 и 3, при условии согласования остальных плеч волноводного кольцевого моста, вся мощность проходит в плечо 2. Таким образом, при работе двух передатчиков на одну антенну, выходы передатчиков целесообразно подключать к плечам 1 и 3 моста, а антенну к плечу 2, или, учитывая симметрию моста, передатчики подключать к плечам 2 и 4, а антенну – к плечу 3.

ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

1. Титульный лист является первым листом пояснительной записки (ПЗ). Он выполняется на листе формата А4 (210×297 мм). Пример заполнения титульных листов дан в Приложении 2.

2. Вторым лист необходимо оставить для рецензии преподавателю. Лист должен содержать заголовок РЕЦЕНЗИЯ.

3. Текстовая часть ПЗ выполняется на листах формата А4 (210×297 мм) в одностороннем исполнении без рамки и основной надписи с простановкой порядковых номеров листов ПЗ в правом нижнем углу.

4. Выполнение ПЗ рекомендуется производить в текстовом редакторе 14 шрифтом Times New Roman через 1,5 интервала. Для абзацев использовать отступ 1,25. Параметры страницы: сверху – 2,0 см; снизу – 2,0 см; слева – 3,0 см; справа – 1,5 см.

5. Используемые источники (учебники, справочники, статьи, стандарты и др.) отмечаются в тексте в порядке их использования номерами в квадратных скобках, например: [6], а при уточнении страницы источника [6, с. 15]. Библиографические сведения указывают в перечне в том виде, в котором они даны в источнике информации.

6. Формулы рекомендуется набирать в редакторе формул по центру строки 14 шрифтом Times New Roman. В качестве символов применяются стандартные обозначения. В формулах четко обозначать буквы, цифры, надстрочные и подстрочные символы и индексы.

7. Рекомендуется нумеровать только те формулы, на которые необходимы ссылки при дальнейшем изложении текста ПЗ. Формулы, как правило, нумеруются в пределах разделов. Допускается сквозная нумерация. Номера формул ставятся с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках.

8. Расшифровка формулы, при необходимости, приводится непосредственно под формулой. В конце формулы ставится запятая, а при необходимости и размерность. Значение каждого символа даются с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле.

Первая строка расшифровки начинается со слова «где» (без двоеточия после него). Например: «Определяем величину напряжения источника питания каскада по формуле:

$$E = 2\sqrt{2P_{\text{нагр}} \cdot R_{\text{нагр}}} + U_{\text{ост}}, \quad (7.1)$$

где $P_{нагр}$ – мощность нагрузки, Вт;
 $R_{нагр}$ – сопротивление катушки громкоговорителя, Ом;
 $U_{ост}$ – остаточное напряжение, В».

9. Расчеты по формулам располагать по левому краю с абзацного отступа. В формулах точка как знак умножения между скобками не ставится. Знак умножения (точка) ставится перед цифрами и дробями. Перенос формулы на следующую строку допускается после знаков: «=» (равняется), «+» (плюс), «·» (умножение) с повторением этих знаков на новой строке.

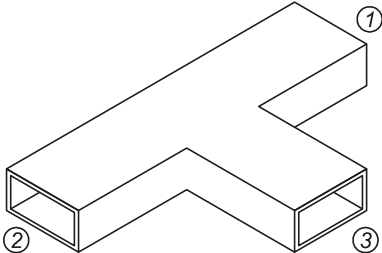
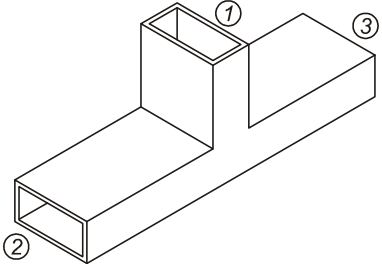
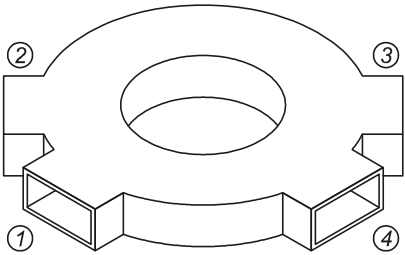
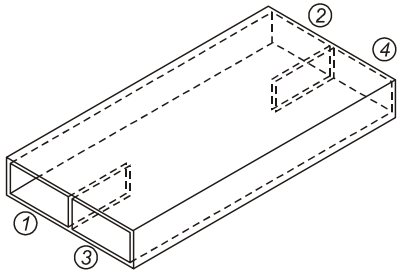
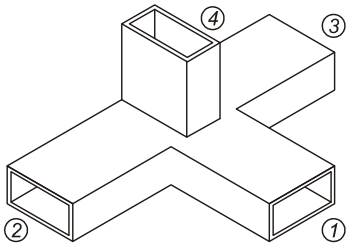
10. Рисунки, графики – далее иллюстрации, нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела ПЗ или сквозной нумерацией по всей ПЗ без учета разделов (рис. 1.1 или рис. 1). Ссылки даются в виде: (рис. 3.2) или (см. рис. 3.2) и, по возможности, сразу после ссылки размещают иллюстрации так, чтобы их можно было рассматривать без поворота листа. Иллюстрации допускается располагать на отдельном листе с поворотом листа на 90° по часовой стрелке.

Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и его наименование помещают после поясняющих данных с выравниванием по центру 14 шрифтом.

Сетка графика определяется масштабом шкал (равномерных или логарифмических) осей координат. На осях графиков указывают наименования и единицы измерения величин, числовые значения которых помещены у делений шкалы.

Матрицы рассеяния некоторых СВЧ-устройств

Таблица П.1

СВЧ устройство	Матрица рассеяния
<p><i>H</i>-тройник с согласованным плечом 3</p> 	$[S] = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} -1 & 1 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \end{vmatrix}$
<p><i>E</i>-тройник с согласованным плечом 1</p> 	$[S] = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 0 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & 1 \end{vmatrix}$
<p>Волноводный кольцевой мост</p> 	$[S] = -\frac{i}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$
<p>Волноводный щелевой мост</p> 	$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & i & 0 & 1 \\ i & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & i \\ 1 & 0 & i & 0 \end{vmatrix}$
<p>Двойной волноводный Т-образный мост</p> 	$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$

Некоторые операции векторного анализа

1. Операции в прямоугольной системе координат:

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}, \quad \operatorname{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}.$$

2. Операции в цилиндрической системе координат:

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{r}_0 & \vec{\varphi}_0 & \vec{z}_0 \\ \frac{r}{\partial} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{r}{\partial} \\ A_r & rA_\varphi & A_z \end{vmatrix}, \quad \operatorname{div} \vec{A} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial(rA_r)}{\partial r} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} \right\} + \frac{\partial A_z}{\partial z}.$$

3. Операции в сферической системе координат:

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{r}_0 & \vec{\theta}_0 & \vec{\varphi}_0 \\ \frac{r^2 \sin \theta}{\partial} & \frac{r \sin \theta}{\partial} & \frac{r}{\partial} \\ A_r & rA_\theta & rA_\varphi \sin \theta \end{vmatrix},$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial(A_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} \right).$$

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
443010, г.Самара, ул. Льва Толстого 23

Отпечатано на лазерном принтере в соответствии с материалами, представленными заказчиком
Отпечатано на кафедре Э и А Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики
443090, г.Самара, Московское шоссе 77.
т. (846) 228-00-50