

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

ПАНАСЮК Ю.Н., ПУДОВКИН А.П.

МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНИКА

**Методические указания
для проведения практических занятий
Часть I**

Утверждено Редакционно-издательским советом ТГТУ
для магистров по направлению 210400 – «Радиотехника»



Тамбов 2014

УДК 621.37 (076.5)

ББК з844.1я73

П16

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Конструирование радиоэлектронных и
микропроцессорных систем»
ГОУ ВПО ТГТУ О.А. Белоусов

Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П.

П16 Микроволновая техника: Методические указания
для проведения практических занятий – Тамбов: ТГТУ, 2014. с. 32.

В пособии приводятся рекомендации решения типовых задач по расчету параметров линий связи, устройств, методов измерения в микроволновой технике.

Предназначено для магистров, обучающихся по направлению 210400 «Радиотехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.37 (076.5)

ББК з844.1я73

Содержание

Введение.....	4
1. Практическое занятие № 1. Расчет линий связи микро- волновой техники.....	4
2. Практическое занятие № 2. Расчет устройств микровол- новой техники.....	14
3. Практическое занятие № 3. Измерение в устройствах микроволновой техники.....	24
Заключение.....	31
Список литературы.....	32

Введение

Учебное пособие отражает разделы линий связи, устройств, измерений микроволновой техники по дисциплине «Микроволновая техника» для магистрантов радиотехнических специальностей вузов. Цель пособия – помочь студентам закрепить усвоение разделов теоретического курса и научиться проводить расчеты и измерения параметров устройств микроволновой техники. Современный радиоспециалист должен ориентироваться в этих вопросах, должен знать возможности различных линий связи и устройств микроволновой техники, их достоинства и недостатки, а в конкретной ситуации суметь правильно выбрать, рассчитать и спроектировать требуемое микроволновое устройство.

Пособие содержит три практических занятия. По своей структуре все практические занятия идентичны, и каждое занятие состоит из шести частей. В первой части содержится цель занятия, во второй – содержание занятия, в третьей – приводится справочный материал в виде основных теоретических сведений и формул, необходимый для проведения расчетов основных параметров и характеристик антенн, в четвертой – индивидуальные задания студентам для решения задач, в пятой – содержание отчета по практическому занятию, в шестой – контрольные вопросы.

Практическое занятие № 1.

Расчет линий связи микроволновой техники

1.1. Цель занятия

Получить навыки расчета линий связи микроволновой техники.

1.2. Содержание работы

1. Провести расчет параметров конструкции коаксиальной линии передачи: внутренний диаметр металлической оплетки D , диаметр центральной жилы d , волновое сопротивление W_{λ} , длину волны Λ , коэффициент затухания α , предельную мощность $P_{пр}$. Исходные данные: тип линии передачи, материал проводника, материал диэлектрика, мощность P , частота сигнала f на входе линии передачи с полосой частот Δf . Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 1.

2. Коаксиальный кабель характеризуется параметрами: D , d , μ , ϵ . Частота сигнала f на входе линии передачи с шириной спектра Δf . Чему равны предельная и допустимая мощности, передаваемые по коаксиальному кабелю. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 2.

3. Провести расчет параметров конструкции волноводной линии передачи: волновое сопротивление W_{λ} , длину волны Λ , коэффициент затухания α , размеры волновода $a \times b$, предельную мощность $P_{пр}$. Исходные данные: тип линии передачи, тип волны, материал внутренних стенок волновода, мощность и частота сигнала на входе линии передачи, полоса частот Δf . Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 3.

4. Прямоугольный волновод характеризуется параметрами: $a \times b$, КБВ. Тип волны с частотой сигнала f на входе линии передачи с шириной спектра Δf . Чему равны предельная и допустимая мощности, передаваемые по волноводу. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 4.

5. Провести расчет параметров конструкции симметричной полосковой линии передачи: коэффициент затухания α , размеры $t, d, a, b, h, \lambda_{кр}$. Исходные данные: материал проводников, материал диэлектрика, частота сигнала f на входе линии передачи, волновое сопротивление $Z_{ПС}$, параметр b/h . Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 5.

6. Провести расчет параметров конструкции несимметричной полосковой линии передачи: коэффициент затухания α , размеры $t, d, h, \lambda_{кр}$. Исходные данные: материал проводников, материал диэлектрика, частота сигнала f на входе линии передачи, волновое сопротивление $Z_{ПН}$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 6.

7. Провести расчет параметров конструкции симметричной полосковой линии передачи: коэффициент затухания α , размеры t, d, a, b, h . Исходные данные: материал проводников, материал диэлектрика, критическая частота $f_{кр}$, волновое сопротивление $Z_{ПС}$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 7.

1.3. Общие сведения

1.3.1. Коаксиальные линии передачи. Они представляют собой два соосных коаксиальных проводника заданных размеров, центрированные шайбами или сплошным диэлектрическим заполнением (рис. 1.1).

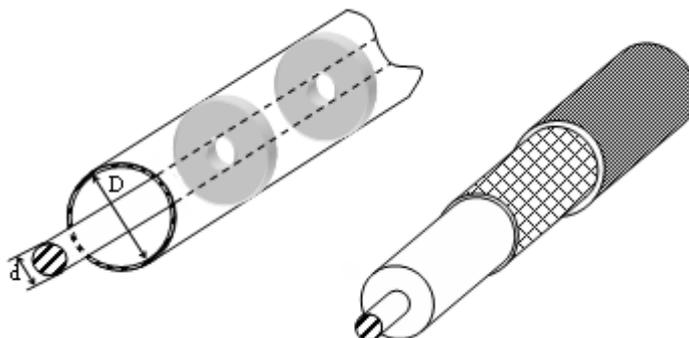


Рис. 1.1. Коаксиальные линии передачи

Волновое сопротивление в коаксиальной ЛП

$$W_{\text{л}} = 138 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \lg\left(\frac{D}{d}\right), \text{ Ом} \quad (1.1)$$

где μ и ε – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости диэлектрика, заполняющего коаксиальную ЛП, D – внутренний диаметр металлической оплетки; d – диаметр центральной жилы.

Длина волны в коаксиальной ЛП

$$\Lambda = \lambda / \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (1.2)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве.

Коэффициент затухания

В коаксиальной ЛП обусловлен потерями в проводниках α_{R} , дБ/м и диэлектрике α_{ε} , дБ/м

$$\alpha = \alpha_{\text{R}} + \alpha_{\varepsilon}. \quad (1.3)$$

Коэффициент затухания в медных проводниках

$$\alpha_{\text{R}} = \frac{1,898 \cdot 10^{-8} \sqrt{\varepsilon f}}{\lg(D/d)} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \quad (1.4)$$

Коэффициент затухания в диэлектрике

$$\alpha_{\varepsilon} = 9 \cdot 10^{-11} \cdot f \sqrt{\varepsilon} \cdot \text{tg} \delta \quad (1.5)$$

где $\text{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon_a}$ – тангенс угла потерь, γ – проводимость среды, f – частота сигнала.

Условия существования поперечная волны Т

$$\pi(D + d) \leq \lambda \quad (1.6)$$

Предельная и допустимая мощности, передаваемые по коаксиальному кабелю

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}^2 \sqrt{\varepsilon} d^2}{480} \ln \frac{D}{d}; \quad P_{\text{доп}} \approx 0,3 \cdot P_{\text{пр}}, \quad (1.7)$$

где $E_{\text{пр}}$, В/м – пробивное напряжение коаксиального кабеля.

Выбор волнового сопротивления в коаксиальной ЛП

Поэтому в настоящее время промышленность выпускает коаксиальные фидеры со стандартными значениями волновых сопротивлений:

$W_{\text{л}} = 50$ Ом, для применения в трактах передачи большой мощности (от передатчика к антенне);

$W_{\text{л}} = 75$ Ом, если основным параметром фидера является минимум потерь (от антенны к приемнику).

Примечание. При расчете параметров коаксиальной линии передачи, диаметр центральной жилы выбирать не менее 0,1 мм.

1.3.2. Волноводные линии передачи. Представляют собой полую металлическую трубу любой формы сечения (прямоугольной (рис. 1.2), круглой, Н- или П-образной).

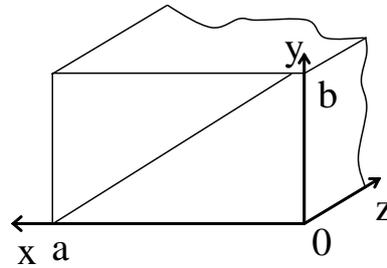


Рис. 1.2. Прямоугольный волновод

Длина волны в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр min}}} \right)^2} \quad (1.8)$$

Критическая длина волны прямоугольного волновода

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2}}, \quad (1.9)$$

где m – число полуволн, укладываемых вдоль широкой стенки волновода a ; n – число полуволн, укладываемых вдоль узкой стенки волновода b .

Волновое сопротивление прямоугольного волновода, заполненного воздухом

Для волны Н-типа

$$Z_{\text{вН}} = Z_0 / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2} \quad (1.10)$$

Для волны Е-типа

$$Z_{\text{вЕ}} = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2} \quad (1.11)$$

Затухание в прямоугольном волноводе

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{R_s \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{Z_0 b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}} = \frac{R_s \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{120\pi b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}, \text{ дБ/м} \quad (1.12)$$

где $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_a}{\gamma}}$ – поверхностное сопротивление металла стенок волновода.

Предельная и допустимая мощности, передаваемые по волноводу

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}^2 \cdot \text{КББ} \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}{480\pi}, \quad (1.13)$$

$$P_{\text{доп}} \approx 0,3 \cdot P_{\text{пр}}, \quad (1.14)$$

где $E_{\text{пр}} = 30$ кВ/см с воздушным заполнением волновода, КБВ – коэффициент бегущей волны в волноводе ($\text{КБВ} = 0,75 \dots 1$).

Размер поперечного сечения прямоугольного волновода, обеспечивающего работу только на основном типе волны H_{10}

$$\frac{\lambda_{\text{max}}}{1,6} \leq a \leq \frac{\lambda_{\text{min}}}{1,1}, \quad (1.15)$$

$$b_{\text{min}} \leq b \leq \frac{\lambda}{2} \quad (1.16)$$

где λ , λ_{max} и λ_{min} – соответственно рабочая, максимальная и минимальная длины волн; b_{min} – минимальный размер узкой стенки при котором исключается пробой волновода (определяется согласно соотношению (1.13)).

1.3.3. Полосковые линии передачи. Различают несимметричные (рис. 1.3 а) и симметричные (рис. 1.3 б) полосковые ЛП.

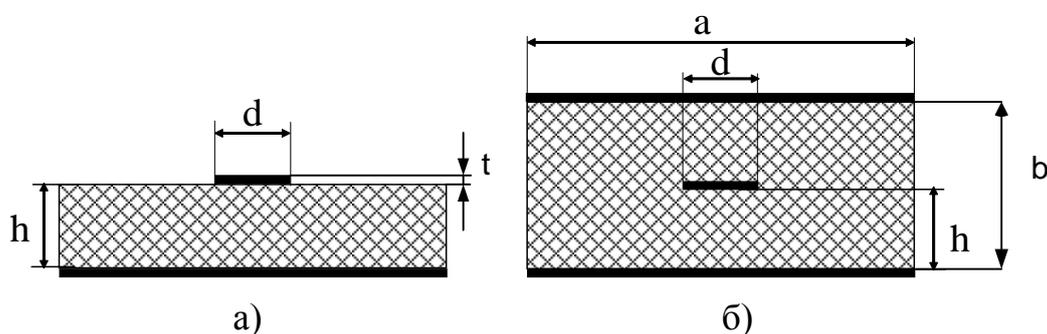


Рис.1.3. Полосковые линии передачи

В симметричных полосковых линиях передачи возбуждается и распространяется Т-волна, в несимметричных – гибридная квази-Т-волна.

Изоляционная прокладка имеет толщину $h = 1 \dots 2$ мм, проводник выбирают размером: ширина $d = 0,1 \dots 0,5$ мм; высота $t = 0,01 \dots 0,005$ мм.

Параметры несимметричной ЛП

Волновое сопротивление

$$Z_{\text{пн}} = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{h}{d}. \quad (1.17)$$

Коэффициент затухания, учитывающий потери в проводнике и диэлектрике симметричной ЛП

$$\alpha = \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{д}}, \text{ дБ/м} \quad (1.18)$$

Потери в проводнике симметричной ЛП

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{0,0231 R_s \sqrt{\epsilon}}{Z_0} = \frac{0,0231 R_s \sqrt{\epsilon}}{120\pi}, \quad (1.19)$$

где $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_a}{\gamma}}$ – поверхностное сопротивление проводников.

Потери в диэлектрике симметричной ЛП

$$\alpha_d = \frac{27,3\sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg}\Delta}{\lambda}. \quad (1.20)$$

Здесь $\operatorname{tg}\Delta$ – тангенс угла потерь.

Критическая частота

$$f_{\text{кр}} = \frac{15}{h\sqrt{\varepsilon}} \frac{1}{(d/h + \pi/4)}, \text{ ГГц.} \quad (1.21)$$

где d и h выражены в сантиметрах.

Параметры симметричной ЛП

Волновое сопротивление

$$Z_{\text{пс}} = \frac{200\sqrt{\mu/\varepsilon}}{1 + d/a} (1 - \lambda/a), \quad \text{при } b/h \leq 2; \quad (1.22)$$

$$Z_{\text{пс}} = \frac{200\sqrt{\mu/\varepsilon}}{1 + d/a(1 - \lambda/a)}, \quad \text{при } b/h > 2. \quad (1.23)$$

Коэффициент затухания, учитывающий потери в проводнике и диэлектрике симметричной ЛП рассчитываются по формулам (1.18) – (1.20).

Критическая частота симметричной ЛП

$$f_{\text{кр}} = \frac{15}{b\sqrt{\varepsilon}} \frac{1}{(d/b + \pi/4)}, \text{ ГГц} \quad (1.24)$$

где d и b выражены в сантиметрах.

Физические постоянные, параметры материалов, параметры стандартных прямоугольных волноводов

Таблица 1.1. Физические постоянные

Символ	Имя	Численное значение	Единица измерения
c	Скорость в вакууме	$2,99792458 \cdot 10^8$	м/с
ε_0	Электрическая постоянная	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
μ_0	Магнитная постоянная	$1,25663706 \cdot 10^{-6}$	Гн/м

Таблица 1.2. Основные электрические параметры диэлектриков

Наименование диэлектрика	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	Пробивное напряжение $E_{\text{пр}}$, кВ/мм
Полиэтилен	2,35	$4,5 \cdot 10^{-4}$	40
Тефлон	2,2	$4 \cdot 10^{-4}$	35
Полистирол	2,55	$3,5 \cdot 10^{-4}$	20
Фторопласт	2,1	$2,5 \cdot 10^{-4}$	40

Таблица 1.3. Основные электрические параметры металлов

Наименование металла	Проводимость $\gamma \cdot 10^7$, См/м	Относительная магнитная проницаемость, μ
Серебро	6,6	≈ 1
Медь	5,9	≈ 1
Алюминий	3,81	≈ 1
Латунь	1,57	≈ 1

Таблица 1.4. Параметры стандартных прямоугольных волноводов

Обозначение типа волновода	Номинальные размеры, мм		Номинальная толщина стенки S, мм
	a	b	
МЭК R			
3	584,2	292,1	4,8
4	533,4	266,7	4,8
5	456,2	228,6	3,2
6	381	190,5	3,2
8	292,1	146,05	3,2
9	247,65	123,82	3,2
12	195,58	97,79	3,2
14	165,1	82,55	2,03
18	129,54	64,77	2,03
22	109,22	54,61	1,03
26	86,36	43,18	2,03
32	72,14	34,04	2,03
35	66,37	29,5	2
40	58,17	29,08	1,63
41	57	25,33	2
48	47,55	22,15	1,63
58	40,39	20,193	1,63
70	34,85	15,799	1,63
84	28,5	12,64	1,63
100	22,86	10,16	1,27
120	19,03	9,525	1,27
140	15,799	7,899	1,02
180	12,954	6,477	1,02
220	10,668	4,318	1,02
260	8,636	4,318	1,02
320	7,112	3,556	1,02
400	5,69	2,845	1,02

1.4. Индивидуальные задания

Таблица 1.5. Индивидуальное задание 1

Вариант	Тип ЛП	Материал проводников	Материал диэлектрика	P, Вт	f, МГц	Δf , МГц
1	ПРД – А	медь	Полиэтилен	10000	5000	10
2	А – ПРМ	медь	Тефлон	10^{-10}	3000	5
3	ПРД – А	медь	Полистирол	7500	1000	3
4	А – ПРМ	медь	Фторопласт	10^{-10}	4000	8
5	ПРД – А	медь	Полиэтилен	12000	2000	4
6	А – ПРМ	медь	Тефлон	10^{-10}	5000	9
7	ПРД – А	медь	Полистирол	8000	3000	4
8	А – ПРМ	медь	Фторопласт	10^{-10}	1000	2
9	ПРД – А	медь	Полиэтилен	9000	4000	6
10	А – ПРМ	медь	Тефлон	10^{-10}	2000	4

Таблица 1.6. Индивидуальное задание 2

Вариант	D, мм	d, мм	μ	ϵ	f, МГц	Δf , МГц
1	10	2	1	1	5000	8
2	8	1	1	2	3000	4
3	12	3	1	4	1000	3
4	14	3	1	3	4000	8
5	5	1	1	1	2000	4
6	6	1	1	2	5000	9
7	7	2	1	4	3000	4
8	4	1	1	3	1000	2
9	3	1	1	1	4000	6
10	11	3	1	2	2000	4

Таблица 1.7. Индивидуальное задание 3

Вариант	Тип ЛП	Тип волны	Материал внутренних стенок волновода	P, Вт	f, ГГц	Δf , МГц
1	ПРД –	H ₁₀	Серебро	4000	3	2
2	ПРД –	H ₁₀	Медь	5000	3,5	1,5
3	ПРД –	H ₁₀	Алюминий	6000	4	1,2
4	ПРД –	H ₁₀	Латунь	3000	5	1,6
5	ПРД –	H ₁₀	Серебро	3500	6	1,5
6	ПРД –	H ₁₀	Медь	4000	7,5	1,2
7	ПРД –	H ₁₀	Алюминий	2000	8	1,6
8	ПРД –	H ₁₀	Латунь	1800	8,8	2,5
9	ПРД –	H ₁₀	Серебро	1900	9	2,4
10	ПРД –	H ₁₀	Медь	1500	10	2,2

Таблица 1.8. Индивидуальное задание 4

Вариант	Тип волны	КБВ	$a \times b$, мм	f , ГГц	Δf , МГц
1	H_{10}	1	23×10	10	2
2	H_{10}	0,9	19×10	12	1
3	H_{10}	0,85	7×4	22	2
4	H_{10}	0,8	6×3	30	1,5
5	H_{10}	0,5	57×25	1	2,5
6	H_{10}	0,9	23×10	10,1	2
7	H_{10}	0,85	19×10	12,5	1
8	H_{10}	0,8	7×4	21,2	2
9	H_{10}	0,7	6×3	30,2	1,5
10	H_{10}	0,9	57×25	0,9	2,5

Таблица 1.9. Индивидуальное задание 5

Вариант	Материал проводников	Материал диэлектрика	f , МГц	$Z_{пс}$, Ом	b/h
1	Серебро	Полиэтилен	3000	100	1,8
2	Медь	Тефлон	4000	75	2,5
3	Алюминий	Полистирол	5000	50	1,9
4	Латунь	Фторопласт	6000	100	3
5	Серебро	Полиэтилен	7000	75	1,7
6	Медь	Тефлон	8000	50	2,4
7	Алюминий	Полистирол	9000	100	1,8
8	Латунь	Фторопласт	2000	75	2,8
9	Серебро	Полиэтилен	2500	50	1,4
10	Медь	Тефлон	5500	100	2,9

Таблица 1.10. Индивидуальное задание 6

Вариант	Материал проводников	Материал диэлектрика	f , МГц	$Z_{пн}$, Ом
1	Серебро	Полиэтилен	3000	100
2	Медь	Тефлон	4000	75
3	Алюминий	Полистирол	5000	50
4	Латунь	Фторопласт	6000	100
5	Серебро	Полиэтилен	7000	75
6	Медь	Тефлон	8000	50
7	Алюминий	Полистирол	9000	100
8	Латунь	Фторопласт	2000	75
9	Серебро	Полиэтилен	2500	50
10	Медь	Тефлон	5500	100

Таблица 1.11. Индивидуальное задание 7

Вариант	Материал проводников	Материал диэлектрика	$f_{кр}$, ГГц	$Z_{пс}$, Ом
1	Серебро	Полиэтилен	3	120
2	Медь	Тефлон	4	75
3	Алюминий	Полистирол	5	50
4	Латунь	Фторопласт	6	80
5	Серебро	Полиэтилен	7	75
6	Медь	Тефлон	8	50
7	Алюминий	Полистирол	9	70
8	Латунь	Фторопласт	2	75
9	Серебро	Полиэтилен	2,5	50
10	Медь	Тефлон	5,5	100

1.5. Содержание отчета по практическому занятию

Отчет по работе должен содержать:

1. Тему и цель работы.
2. Выполнение и оформление содержания работы.
3. Выводы по решенным задачам.

1.6. Контрольные вопросы

1. Какие линии передачи являются регулярными?
2. Перечислите основные требования, предъявляемые к линиям передачи.
3. Назовите основные параметры регулярных линий передачи.
4. От чего зависит выходная мощность сигнала на выходе линии передачи?
6. Влияние материала проводов на параметры коаксиальной линии передачи.
7. Влияние материала диэлектрика на параметры коаксиальной линии передачи.
8. От каких параметров зависит предельная и допустимая мощности, передаваемые по коаксиальному кабелю.
9. От каких параметров коаксиального кабеля зависит его коэффициент затухания?
10. Влияние материала волновода на его параметры.
11. От каких параметров волновода зависит его коэффициент затухания?
12. От каких параметров зависит предельная и допустимая мощности, передаваемые по волноводу?
13. От каких параметров симметричной ЛП зависит ее волновое сопротивление?
14. Отличительные особенности симметричной и несимметричной ЛП.

Практическое занятие № 2

Расчет устройств микроволновой техники

2.1. Цель занятия

Получить навыки расчета устройств микроволновой техники.

2.2. Содержание работы

1. Провести расчет параметров ненаправленного делителя мощности с одной согласующей ступенькой в выходных плечах, во входном плече. Исходные данные: Z_0 , f_0 , f_1 и f_2 , $K_{СВ_{МАХ}}$, ϵ , h , μ , $tg\Delta$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 1.

2. Провести расчет параметров ненаправленного делителя мощности с двухступенчатыми согласующими трансформаторами в выходных плечах, во входном плече, во входном и выходном плечах одновременно. Исходные данные: Z_0 , f_0 , f_1 и f_2 , $K_{СВ_{МАХ}}$, ϵ , h , μ , $tg\Delta$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 2.

3. Провести расчет параметров направленного делителя мощности с неравным делением в его выходных плечах. Исходные данные: Z_0 , $Z_{н}$, f_0 , P_1 , P_2 , ϵ , h , ρ , μ , $tg\Delta$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 3.

4. Провести расчет параметров кольцевого моста. Исходные данные: Z_0 , λ_0 , h , μ , ϵ , $tg\Delta$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 4.

5. Провести расчет параметров шлейфного моста. Исходные данные: Z_0 , λ_0 , h , μ , ϵ , $tg\Delta$. Исходные данные по вариантам приведены в индивидуальном задании 5.

2.3. Общие сведения

2.3.1. Делители мощности (ДМ) – это устройства линий передачи, предназначенные для разделения электромагнитной энергии из одного входного канала (плеча) на несколько в заданном отношении.

Делители мощности ненаправленные

Тройники с одной согласующей ступенью представлен на рис. 2.1. Основная электрическая характеристика ДМ – частотная характеристика КСВ со стороны плеч (рис. 2.1 в). Допустимый максимальный уровень $K_{СВ_{max}}$ в рабочем диапазоне с требуемым перекрытием граничных частот $K_{п} = f_{max}/f_{min}$.

Расчет ненаправленного ДМ с одной согласующей ступенькой

1. Задают: волновое сопротивление тракта Z_0 ; центральную частоту рабочего диапазона f_0 ; граничные частоты рабочей полосы f_1 и f_2 ; максимально допустимое значение коэффициента стоячей волны плеч делителя в диапазоне $K_{СВ_{МАХ}}$.

2. Выбирают (задают): материал ϵ и толщину h электрической подложки, а также структуру делителя мощности из числа изображен-

ных на рис. 2.1 а и 2.1 б.

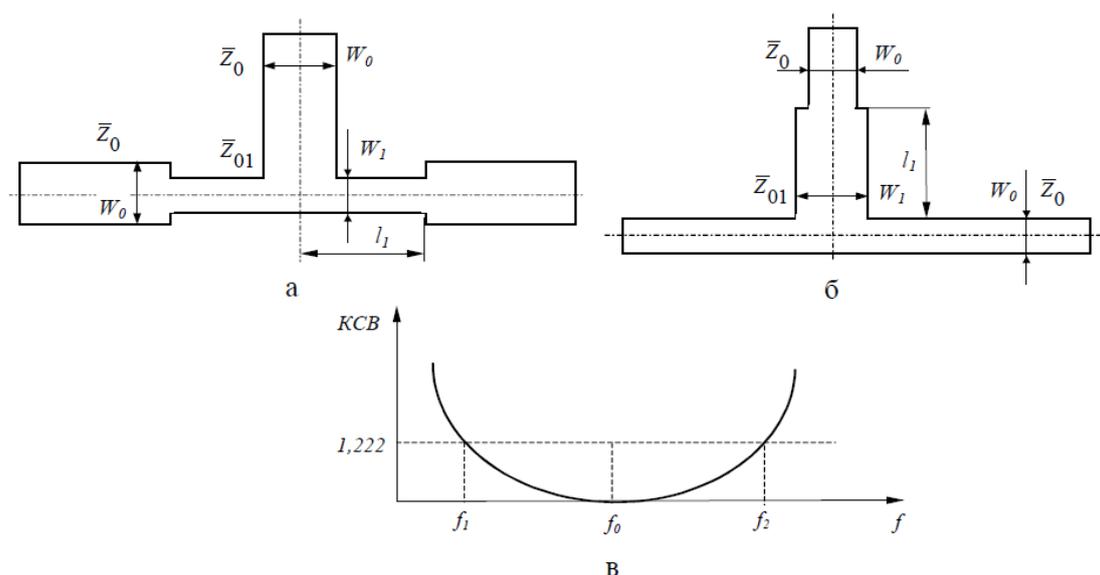


Рис. 2.1 – Ненаправленные ДМ с одной согласующей ступенькой:
 (а) – в выходных плечах; (б) – во входном плече;
 (в) – типовая частотная характеристика

3. **Определяют:** волновые сопротивления согласующих ступеней Z_i и геометрические размеры структуры делителя (W_i, l_i). Для заданного KCB_{\max} определяют волновые сопротивления \bar{Z}_i . Для схемы (рис. 2.1 а) $\bar{Z}_0=1, \bar{Z}_{01}=\bar{Z}_1=1,41$, для схемы (рис. 2.1б) $\bar{Z}_0=1, \bar{Z}_{01}=\bar{Z}_1=0,707$.

Для выбранного делителя мощности определяют волновое сопротивление согласующей ступени

$$Z_{01} = \bar{Z}_{01} \cdot Z_0 \quad (2.1)$$

Ширина проводника

$$d_i = \frac{8e^A h}{e^{2A} - 2}, \quad A = \frac{Z_i}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon} \right). \quad (2.2)$$

Длина согласующей ступеньки

$$l_i = \frac{\Lambda_i}{4}, \quad \Lambda_i = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}i}}}, \quad \varepsilon_{\text{эф}i} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{d_i}}, \quad (2.3)$$

где h – толщина изоляционной прокладки ($h = 1 \dots 2$ мм).

Ширина экрана

$$W_i = 4d_i \quad (2.4)$$

Коэффициент затухания, учитывающий потери в проводнике и диэлектрике моста

$$\alpha_i = \alpha_{\text{пр}i} + \alpha_{\text{д}i}, \text{ дБ/м} \quad (2.5)$$

Потери в проводнике

$$\alpha_{\text{при}} = \frac{0,0231}{Z_i \cdot d_i} \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \varepsilon}{\gamma}}, \quad (2.6)$$

Потери в диэлектрике

$$\alpha_{\text{ди}} = \frac{27,3 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \Delta}{\Lambda_i} \frac{\sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_i}} + 1}{\varepsilon + \sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_i}} - 1}. \quad (2.7)$$

Расчет ненаправленного ДМ с двумя согласующими ступеньками

1. Задают: волновое сопротивление тракта Z_0 ; центральную частоту рабочего диапазона f_0 ; граничные частоты рабочей полосы f_1 и f_2 ; максимально допустимое значение коэффициента стоячей волны плеч делителя в диапазоне КСВ_{max} .

2. Выбирают (задают): материал ε и толщину h диэлектрической подложки, а также структуру делителя мощности из числа изображенных на рис. 2.2 а и 2.2 б.

3. **Определяют:** волновые сопротивления согласующих ступеней Z_i и геометрические размеры структуры делителя (W_i, l_i). Из табл. 2.1 для заданного КСВ_{max} определяют волновые сопротивления \bar{Z}_i .

Для схемы (рис. 2.2 а): $\bar{Z}_0 = 1, \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_1, \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_2$.

Для схемы (рис. 2.2 б): $\bar{Z}_0 = 1, \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_1, \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_2 / 2$.

Для схемы (рис. 2.2 в): $\bar{Z}_0 = 1, \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_1 / 2, \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_2 / 2$.

Таблица 2.1. Параметры двухступенчатых тройников с чебышевскими характеристиками КСВ плеч

КСВ_{max}	1,04	1,105	1,222
$K_{\text{п}} = f_2/f_1$	1,588	1,994	2,731
\bar{Z}_1	1,201	1,219	1,250
\bar{Z}_2	1,665	1,640	1,600

Для выбранного делителя мощности определяют волновые сопротивления согласующей ступени

$$Z_{01} = \bar{Z}_{01} \cdot Z_0 \quad (2.8)$$

Ширину проводника d_i , длину согласующей ступеньки l_i , ширину экрана W_i , коэффициент затухания α_i определяют выражениями (2.2) – (2.7).

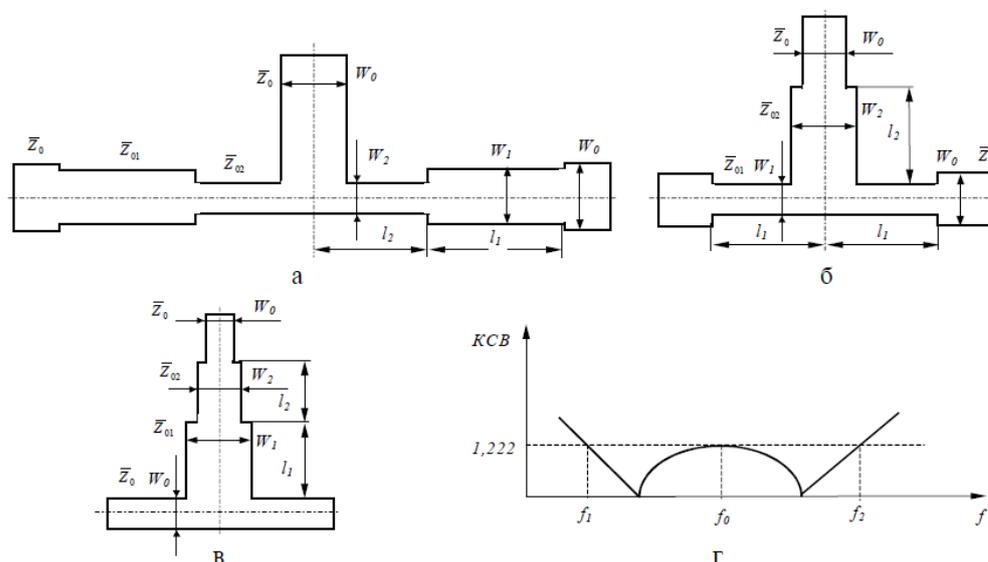


Рис. 2.2. Разновидности широкополосных тройников, имеющие двухступенчатый переход: (а) – с двухступенчатым согласующими трансформаторами в выходных плечах; (б) – с двухступенчатым согласующими трансформаторами во входном и выходном плечах; (в) – с двухступенчатыми согласующими трансформаторами во входном плече; (г) – частотная характеристика двухступенчатого тройника

Делители мощности направленные с неравным делением

Делители мощности направленные с неравным делением – СВЧ тройники с электрически изолированными выходными плечами, предназначенные для деления мощности P_0 в отношении $k^2 = P_2/P_1$ между выходными плечами.

Расчет делителя мощности направленного с неравным делением

Общий вид делителя показан на рис. 2.3.

Задают: волновое сопротивление тракта Z_0 ; волновое сопротивление линии Z_H ; нагружающие выходные плечи направленного делителя мощности с неравным делением; коэффициент деления мощности в выходных плечах $k^2 = P_2/P_1$, ($P_2 > P_1$); центральную частоту рабочей полосы f_0 .

Выбирают (задают): материал ϵ и толщину h подложки; удельное сопротивление ρ пленочного резистора R .

Определяют: волновые сопротивления секций делителя Z_i ; сопротивление резистора R ; геометрические размеры структуры МПЛ делителя W_i , l_i и резистора R .

В табл. 2.2 приведены нормированные параметры делителя мощности для различных отношений мощностей в его выходных плечах $P_2:P_1$.

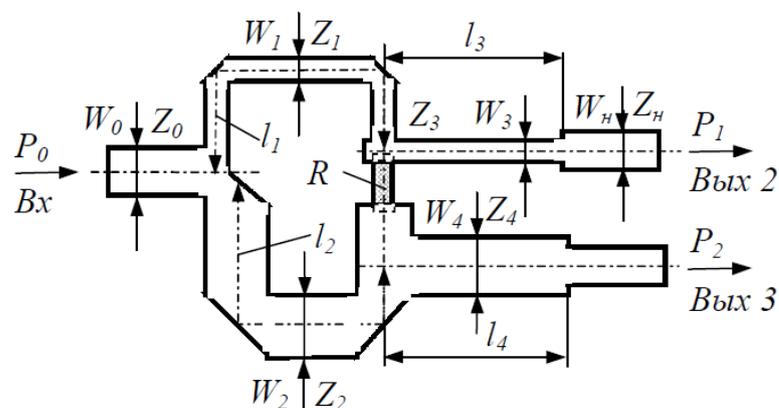


Рис. 2.3. Делитель мощности направленный с неравным делением

Таблица 2.2. Нормированные параметры делителя мощности

$P_2:P_1$	$10\lg(P_2/P_1)$	\bar{Z}_1	\bar{Z}_2	\bar{Z}_3	\bar{Z}_4	\bar{R}
1:1	0	1,414	1,414	1	1	2
1,06:1	0,1	1,431	1,398	1,006	0,994	2
1,12:1	0,5	1,499	1,336	1,029	0,972	2,003
1,26:1	1,0	1,592	1,265	1,059	0,944	2,013
1,58:1	2,0	1,804	1,138	1,122	0,891	2,053
2:1	3,0	2,057	1,031	1,189	0,841	2,120
2,5:1	4,0	2,354	0,943	1,258	0,794	2,215
3,16:1	5,0	2,721	0,860	1,334	0,750	2,341

Волновые сопротивления кольцевых ветвей делителя Z_1 и Z_2

$$Z_1 = \sqrt{k(k^2 + 1)} \cdot Z_0, \quad Z_2 = \sqrt{\frac{k^2 + 1}{k^3}} \cdot Z_0. \quad (2.9)$$

Волновые сопротивления четвертьволновых трансформаторных секций

$$Z_3 = \sqrt{kZ_H Z_0}, \quad Z_4 = \sqrt{\frac{Z_H Z_0}{k}}. \quad (2.10)$$

Ширину проводника d_i , длину согласующей ступеньки l_i , ширину экрана W_i , коэффициент затухания α_i определяют выражениями (2.2) – (2.7).

Сопротивление резистора R

$$R = \frac{k^2 + 1}{k} Z_0. \quad (2.11)$$

По значению сопротивления резистора R определяются его геометрические размеры $b \times l$ с учетом с учетом проводящих выводов l_B (рис. 2.4)

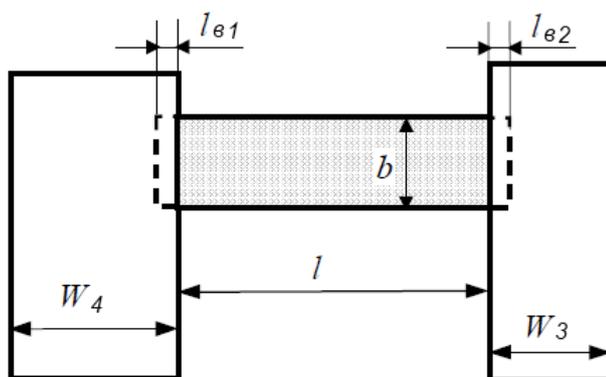


Рис. 2.4. Подключение резистора R к трансформаторным секциям

Длина пленочного сопротивления $l \leq 0,1 \frac{\Lambda_i}{4}$, $l_{B1} = 2d_4$, $l_{B2} = 2d_3$,
ширина пленочного сопротивления $b \leq W_3$.

Сопротивление R с учетом геометрических размеров и его удельного сопротивления ρ

$$R = \rho \frac{l + l_{B1} + l_{B2}}{b \cdot t} \quad (2.12)$$

Толщина пленочного сопротивления t находится из формулы (2.12).

2.3.2. Мостовое устройство (мост) – это многоплечее устройство, предназначенное для деления энергии, поступающей в одно из плеч, между некоторыми другими или для суммирования энергии, поступающей в какие-то из плеч при условии развязки между ними.

Кольцевой мост

Расчет кольцевого моста (рис. 2.5) сводится к определению среднего диаметра d_{cp} и ширины полоски кольца W_k при заданных значениях волнового сопротивления Z_0 питающей линии, рабочей длине волны λ_0 и толщине подложки h .

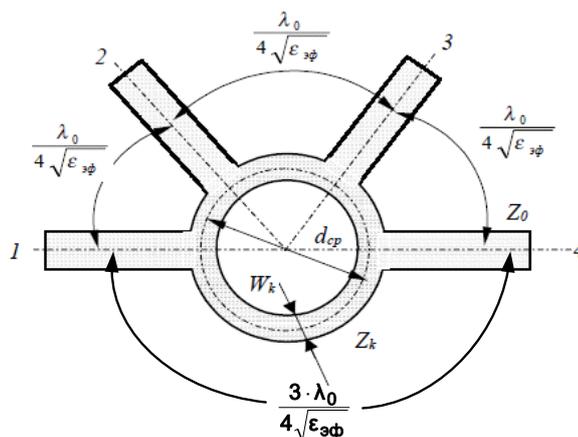


Рис. 2.5. Кольцевой мост

Волновое сопротивление кольца моста

$$Z_k = \sqrt{2} \cdot Z_0. \quad (2.13)$$

Ширина проводника кольца

$$d = \frac{8e^A h}{e^{2A} - 2}, \quad A = \frac{Z_k}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon} \right). \quad (2.14)$$

Длина моста

$$l_{\text{моста}} = \frac{3\Lambda_k}{2}, \quad \Lambda_k = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}, \quad \varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{d}}. \quad (2.15)$$

Ширина экрана кольца

$$W_k = 4d. \quad (2.16)$$

Средний, внешний и внутренний диаметры кольца

$$d_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{моста}}}{\pi}, \quad d_{\text{внеш.}} = \frac{l_{\text{моста}}}{\pi} + \frac{W_k}{2}, \quad d_{\text{внутр.}} = \frac{l_{\text{моста}}}{\pi} - \frac{W_k}{2}. \quad (2.17)$$

Коэффициент затухания, учитывающий потери в проводнике и диэлектрике кольца

$$\alpha = \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{д}}, \quad \text{дБ/м} \quad (2.18)$$

Потери в проводнике

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{0,0231}{Z_0 \cdot d} \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \varepsilon}{\gamma}}, \quad (2.19)$$

Потери в диэлектрике

$$\alpha_{\text{д}} = \frac{27,3 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \Delta}{\Lambda_k} \frac{\sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_k}} + 1}{\varepsilon + \sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_k}} - 1}. \quad (2.20)$$

Коэффициент стоячих волн (КСВ)

$$\text{КСВ} = \frac{13 \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha + 4}{11 \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha + 4}. \quad (2.21)$$

Развязка изолированного плеча

$$L_{\text{разв.}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{12 \cdot \alpha + \sqrt{2}}{\sqrt{2} \cdot \alpha} \right). \quad (2.22)$$

Шлейфный мост

Волновое сопротивление шлейфов (рис. 2.6) будет равным волновому сопротивлению основной линии.

Волновое сопротивление отрезков линии между шлейфами l

$$Z_l = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.23)$$

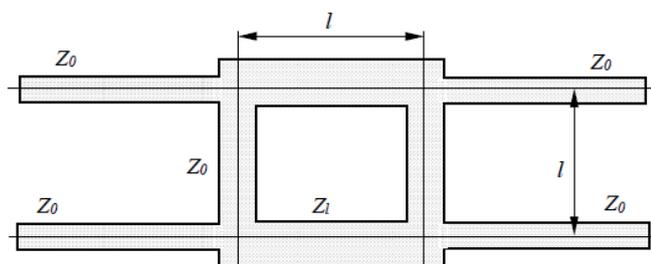


Рис. 2.6. Шлейфный мост

Ширина проводника

$$d = \frac{8e^A h}{e^{2A} - 2}, \quad A = \frac{Z_k}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon} \right)}. \quad (2.24)$$

Длина моста

$$L_{\text{моста}} = 4l = \frac{4\Lambda_k}{4} = \Lambda_k, \quad \Lambda_k = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}, \quad \varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{d}}. \quad (2.25)$$

Ширина экрана кольца

$$W_k = 4d. \quad (2.26)$$

Коэффициент затухания, учитывающий потери в проводнике и диэлектрике кольца

$$\alpha = \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{д}}, \text{ дБ/м} \quad (2.27)$$

Потери в проводнике

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{0,0231}{Z_0 \cdot d} \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \varepsilon}{\gamma}}, \quad (2.28)$$

Потери в диэлектрике

$$\alpha_{\text{д}} = \frac{27,3 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \Delta}{\Lambda_k} \frac{\sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_k}} + 1}{\varepsilon + \sqrt{1 + \frac{10 \cdot h}{W_k}} - 1}. \quad (2.29)$$

Коэффициент стоячих волн (КСВ)

$$\text{КСВ} = \frac{2 + 3 \cdot \alpha_{\text{пр}} + 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha_{\text{д}}}{2 \cdot \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{2} \cdot \alpha_{\text{д}}}. \quad (2.30)$$

Развязка изолированного плеча

$$L_{\text{разв.}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{2(1 + \alpha_{\text{пр}} + \sqrt{2} \cdot \alpha_{\text{д}})}{\alpha_{\text{пр}} + \sqrt{2} \cdot \alpha_{\text{д}}} \right). \quad (2.31)$$

2.5. Индивидуальные задания

Таблица 2.1. Индивидуальное задание 1

Вариант	Z_0 , Ом	f_0 , ГГц	f_1 , МГц	f_2 , МГц	KCB_{MAX}	ε	μ	$tg\Delta$ 10^{-4}	h , мм
1	50	10	9.9	10,1	1,2	1,5	1	1	2
2	75	9	8.9	9,1	1,2	2	1	2	2
3	60	8	7.9	8,1	1,2	2,5	1	3	2
4	80	7	6.9	7,1	1,2	3	1	4	2
5	90	6	5.9	6,1	1,2	3,5	1	1,1	2
6	100	5	4.9	5,1	1,2	1,5	1	1,5	2
7	65	4	3.9	4,1	1,2	2	1	2,2	2
8	70	3	2.9	3,1	1,2	2,5	1	2,5	2
9	95	2	1.9	2,1	1,2	3	1	3,5	2
10	55	1	0.9	1,1	1,2	3,5	1	4,5	2

Таблица 2.2. Индивидуальное задание 2

Вариант	Z_0 , Ом	f_0 , ГГц	f_1 , МГц	f_2 , МГц	KCB_{MAX}	ε	μ	$tg\Delta$ 10^{-4}	h , мм
1	50	10	9.9	10,1	1,2	1,5	1	1	2
2	75	9	8.9	9,1	1,2	2	1	2	2
3	60	8	7.9	8,1	1,2	2,5	1	3	2
4	80	7	6.9	7,1	1,2	3	1	4	2
5	90	6	5.9	6,1	1,2	3,5	1	1,1	2
6	100	5	4.9	5,1	1,2	1,5	1	1,5	2
7	65	4	3.9	4,1	1,2	2	1	2,2	2
8	70	3	2.9	3,1	1,2	2,5	1	2,5	2
9	95	2	1.9	2,1	1,2	3	1	3,5	2
10	55	1	0.9	1,1	1,2	3,5	1	4,5	2

Таблица 2.3. Индивидуальное задание 3

Вариант	Z_0 , Ом	Z_H , Ом	f_0 , ГГц	P_1 , мВт	P_2 , мВт	ε	μ	h , мм	ρ , Ом·м	$tg\Delta$ 10^{-4}
1	55	55	10	20	30	1,5	1	2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	1
2	50	50	9	10	20	2	1	2	$1,2 \cdot 10^{-8}$	2
3	75	75	8	15	10	2,5	1	2	$1,8 \cdot 10^{-8}$	3
4	60	60	7	18	15	3	1	2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	4
5	80	80	6	40	18	3,5	1	2	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1,1
6	90	90	5	25	40	1,5	1	2	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1,5
7	100	100	4	30	25	2	1	2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	2,2
8	65	65	3	24	30	2,5	1	2	$1,2 \cdot 10^{-8}$	2,5
9	70	70	2	35	24	3	1	2	$1,8 \cdot 10^{-8}$	3,5
10	95	95	1	5	35	3,5	1	2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	4,5

Таблица 2.4. Индивидуальное задание 4

Вариант	Z_0 , Ом	λ_0 , см	h , мм	ϵ	μ	$\text{tg}\Delta$ 10^{-4}
1	55	2	2	1,	1	1
2	50	3	2	2	1	2
3	75	2,	2	2,	1	3
4	60	3,	2	3	1	4
5	80	1,	2	3,	1	1,1
6	90	2	2	1,	1	1,5
7	100	3	2	2	1	2,2
8	65	2,	2	2,	1	2,5
9	70	3,	2	3	1	3,5
10	95	1,	2	3,	1	4,5

Таблица 2.5. Индивидуальное задание 5

Вариант	Z_0 , Ом	λ_0 , см	h , мм	ϵ	μ	$\text{tg}\Delta$ 10^{-4}
1	55	2	2	1,5	1	1
2	50	3	2	2	1	2
3	75	2,5	2	2,5	1	3
4	60	3,5	2	3	1	4
5	80	1,5	2	3,5	1	1,1
6	90	2	2	1,5	1	1,5
7	100	3	2	2	1	2,2
8	65	2,5	2	2,5	1	2,5
9	70	3,5	2	3	1	3,5
10	95	1,5	2	3,2	1	4,5

2.5. Содержание отчета по практическому занятию

Отчет по работе должен содержать:

4. Тему и цель работы.
5. Выполнение и оформление содержания работы.
6. Выводы по решенным задачам.

2.6. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные требования, предъявляемые к микрополосковым устройствам.
2. Влияние материала проводов на параметры микрополосковых устройств.
3. Влияние материала диэлектрика на параметры микрополосковых устройств.
4. От каких параметров зависит коэффициент развязки микрополоскового устройства?
5. От каких параметров зависит коэффициент стоячих волн микрополоскового устройства?
6. Отличительные особенности направленного и ненаправленного делителей мощности.
7. Отличительные особенности кольцевого и шлейфного мостов.

Практическое занятие № 3

Измерение в устройствах микроволновой техники

3.1. Цель занятия

Получить навыки измерения параметров устройств микроволновой техники.

3.2. Содержание работы

1. Измерение мощности микроволновых сигналов.

3.3. Общие сведения

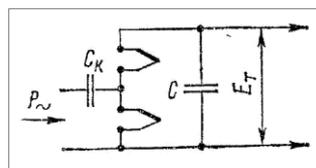
3.3.1. Измерение мощности СВЧ сигналов. Осуществляется измерительными приборами, предназначенными для измерения мощности электромагнитного сигнала.

Термисторные измерители мощности

Состоят из приемного преобразователя с чувствительным элементом термистором и измерительного моста с источником низкочастотного переменного тока для подогрева термистора. Принцип действия термисторного преобразователя состоит в зависимости сопротивления термистора от температуры его нагрева, которая, в свою очередь зависит от рассеиваемой мощности сигнала, подаваемого на него. Измерение мощности осуществляется методом сравнения мощности измеряемого сигнала, рассеиваемой в термисторе и разогревающей его, с мощностью тока низкой частоты, вызывающей такой же нагрев термистора. В процессе измерения полная мощность, рассеиваемая на термисторе (при подаче на него одновременно измеряемого сигнала и тока подогрева) и, соответственно, сопротивление термистора поддерживается одинаковым с помощью измерительного моста, который уравнивается изменением тока подогрева. В первых моделях термисторных ваттметров уравнивание осуществлялось вручную, в современных ваттметрах уравнивание автоматическое, показания выводятся в цифровом виде. К недостаткам термисторных измерителей мощности относится их малый динамический диапазон. Пример: МЗ-22А.

Термоэлектрические измерители мощности

В термоэлектрических измерителях преобразуется энергия СВЧ в термоЭДС с помощью высокочастотных термопар, включаемых в приемный преобразователь в качестве поглощающей нагрузки. Конструкции термоэлектрических преобразователей различны, но электрическая схема их может быть представлена рис. Две термопары соединены для СВЧ-тракта параллельно, а для цепи постоянного тока — последовательно. Термопара состоит из двух тонких пленок (висмут—сурьма или хромель—копель), напыленных в вакууме на диэлектри-



ческую подложку. Общее сопротивление двух соединенных параллельно термопар должно равняться волновому сопротивлению линии передачи: $\rho = R_T/2$. Конструктивный конденсатор C_k разделяет цепи СВЧ и постоянного тока. На выходе приемного преобразователя включается непосредственно или через усилитель постоянного тока магнитоэлектрический измеритель термоЭДС E_T . Так как $P_{\sim} = E_T/k$, шкалу измерителя градуируют в единицах мощности (коэффициент преобразования термопары $k \approx 1$ мВ/мВт).

К достоинствам термоэлектрического метода относятся: широкий диапазон частот; малое время измерения; малая зависимость показаний от температуры окружающей среды; широкие пределы измеряемой мощности, которые можно расширить применением внешних аттенуаторов и направленных ответвителей на входе преобразователя и высокочувствительных усилителей постоянного тока на выходе.

Термоэлектрический ваттметр со стрелочным индикатором легко превратить в ваттметр с цифровым отсчетом. Для этого вместо магнитоэлектрического измерителя нужно включить цифровой микровольтметр постоянного тока. Примеры: МЗ-51, МЗ-52, МЗ-53, МЗ-90, МЗТ-1810.

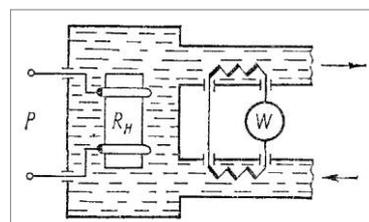
Калориметрические измерители мощности

Эти приборы относятся к наиболее точным измерениям высокочастотной мощности больших и средних значений практически на любой частоте. Он основан на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую. Калориметрический ваттметр состоит из приемного преобразователя, в котором расположена нагрузка, поглощающая электромагнитную энергию. При этом выделяется теплота, нагревающая некоторое рабочее тело. С помощью измерительного узла измеряется температура рабочего тела, и по ее значению определяется значение мощности. Ваттметры выполняются с твердым или, чаще, с жидким рабочим телом, работают в адиабатном режиме (без теплоотдачи во внешнюю среду) или при постоянной температуре рабочего тела.

Наибольшее распространение получили проточные (поточные) калориметрические ваттметры с непрерывно циркулирующей жидкостью — водой

или кремнийорганической смесью. Здесь значение мощности функционально связано с

разностью температур жидкости на входе и выходе преобразователя, T_1 и T_2 соответственно. В установившемся режиме количество теплоты, выделяемой на нагрузке R_H , равно количеству отводимой жидкостью теплоты: $Q_H = 0,24I^2R_H = Q_{ж} = cv(T_2 - T_1)$, откуда $0,24P = c(v/t)\Delta T$ (c — удельная теплоемкость, v — объем жидкости). Измеряемая мощность



$$P = \frac{c \cdot v \cdot \Delta T}{0,24 \cdot t} \approx \frac{4,18 \cdot c \cdot v \cdot \Delta T}{t}$$

При постоянных удельной теплоемкости и скорости протекания жидкости v/t измеряемая мощность прямо пропорциональна разности температур: $P=a\Delta T$. Для измерения ΔT применяют батареи термопар, термоЭДС которых определяется с помощью магнитоэлектрического милливольтметра. Если термобатареи включить последовательно и встречно, то показание милливольтметра будет пропорционально ΔT и его шкалу можно градуировать в единицах мощности — ваттах. Примеры: МЗ-54, МЗ-56.

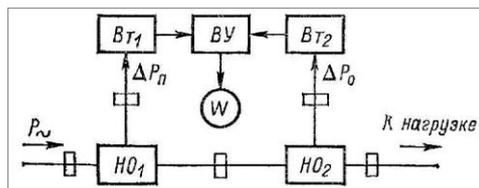
Диодные измерители мощности

В качестве первичного преобразователя используют низкобарьерные диоды или диодные сборки. Принцип действия диодного измерителя мощности основан на преобразовании энергии СВЧ в постоянный ток на амплитудном детекторе. Это преобразование осуществляется благодаря выпрямительным свойствам диода, которое обусловлено нелинейностью их вольтамперной характеристики. К достоинствам данных измерителей мощности можно отнести малое время реакции при подаче мощности СВЧ сигнала, широкий динамический диапазон, возможность измерения малых значений мощности СВЧ сигналов (от 100 пкВт). Примеры: МЗД-1820, МЗД-11810, МЗД-17810.

Измерители проходящей мощности

Метод ответвления реализуется с помощью любых ваттметров поглощаемой мощности в совокупности с направленными ответвителями. Здесь отметим, что они характеризуются переходным ослаблением $S=10\lg(P_{\Pi}/\Delta P_{\Pi})$ и коэффициентом направленности $D = 10 \lg(\Delta P_{\Pi}/\Delta P_0)$, где P_{Π} — значение падающей мощности в основном тракте; ΔP_{Π} и ΔP_0 — значения ответвленной мощности падающей и отраженной волн в измерительном тракте. Коэффициент D обычно составляет $20 \div 40$ дБ; $S = 10 \div 30$ дБ.

Направленные ответвители HO_1 и HO_2 с одинаковыми характеристиками и противоположными ориентациями включены последовательно в линию передачи. Ответвленные мощности падающей и отраженной волн



измеряются поглощающими ваттметрами $ВТ_1$ и $ВТ_2$. Результат измерения каждым ваттметром подается на вычитающее устройство $ВУ$, на выходе которого включен магнитоэлектрический измеритель, градуированный в единицах мощности. Его показания пропорциональны проходящей мощности.

Метод поглощающей стенки реализуется в конструкции, состоящей из отрезка волновода, часть боковой стенки которого заменена поглощающей платиновой пленкой. При прохождении по волноводу

энергии СВЧ-пленка нагревается, ее сопротивление изменяется. Измерительный узел, выполняемый обычно по мостовой схеме, позволяет измерить проходящую мощность СВЧ, замещая ее мощностью постоянного тока. Метод позволяет измерять малые, средние и большие мощности на участках рабочих диапазонов частот волноводов. Метод прост и надежен. Большим недостатком метода является инерционность и значительная погрешность измерения. Для уменьшения погрешности применяют предварительную калибровку на постоянном токе.

Зондовый метод основан на измерении напряженности электромагнитного поля (обычно его электрической составляющей) в нескольких точках линии передачи и определении проходящей мощности по известным соотношениям. Напряженность поля измеряется зондами, представляющими собой миниатюрные преобразователи с элементами связи. Зонды характеризуются коэффициентом преобразования и амплитудной характеристикой. В большинстве случаев применяют зонды в виде металлических или полупроводниковых термопар, которые погружаются в полость волновода на 0,1—0,2 мм в определенном порядке. Число зондов колеблется от двух до восьми. Мощность СВЧ вызывает нагрев термопар, и на их выходных (холодных) концах появляется термоЭДС, пропорциональная проходящей мощности. Метод прост, позволяет измерять средние и большие мощности; индикация возможна простым стрелочным прибором. К недостаткам следует отнести значительную погрешность (больше 10%), зависимость показаний от точности согласования, узкополосность и необходимость калибровки на рабочих уровнях мощности.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.1.

В схеме (рис. 3.1) производится одновременная калибровка детекторной головки, выход генератора и вход измерителя мощности согласующими устройствами для повышения точности измерения.

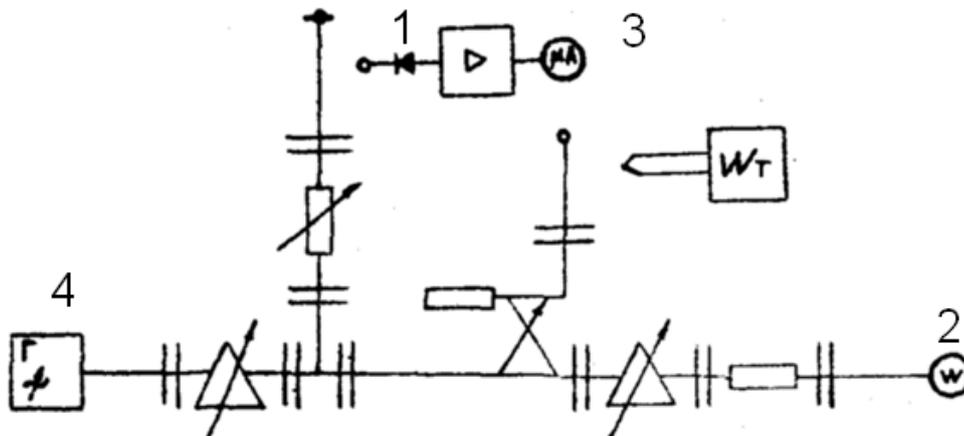


Рис. 3.1. Лабораторная установка измерения мощности

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой по измерению ма-

лой мощности сигналов СВЧ.

2. Подготовить к работе измеритель мощности, генератор СВЧ, измеритель тока.

3. Исследовать зависимость показаний выходного тока детектора от мощности на выходе генератора СВЧ на различных частотах.

4. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

5. По данным таблицы 3.1 построить зависимость показаний выходного тока детектора от мощности на выходе генератора СВЧ на различных частотах.

Таблица 3.1. Результаты измерений

$f_{\text{ГСВЧ1}}, \text{ ГГц}$		$f_{\text{ГСВЧ2}}, \text{ ГГц}$		$f_{\text{ГСВЧ3}}, \text{ ГГц}$	
$I, \mu\text{A}$	$P, \text{ мВт}$	$I, \mu\text{A}$	$P, \text{ мВт}$	$I, \mu\text{A}$	$P, \text{ мВт}$
.
.

3.3.2. Измерение коэффициента затухания в коаксиальных кабелях. Коаксиальная ЛП – два соосных проводника с заданными размерами, центрированные диэлектрическими шайбами или сплошным диэлектрическим заполнением. Одножильный или многожильный внутренний проводник окружен слоем высококачественного диэлектрика (полистирол, полиэтилен, фторопласт и т.д.), поверх которого располагается внешний проводник.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.2.

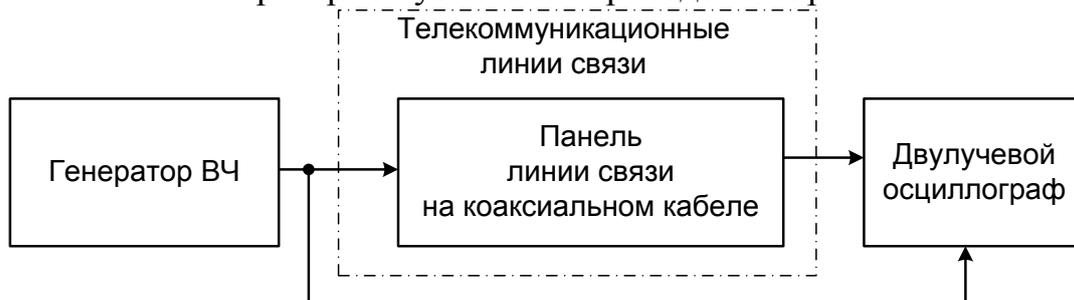


Рис. 3.2. Лабораторная установка измерения коэффициента затухания в коаксиальных кабелях

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой по исследованию коэффициента затухания в коаксиальных кабелях.

2. Подготовить к работе генератор ВЧ и двулучевой осциллограф.

3. Снять показания напряжения на входе и выходе коаксиального кабеля в зависимости от его длины.

4. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

5. Рассчитать коэффициент затухания коаксиального кабеля в зависимости от его длины α , dB

$$\alpha = 20 \lg \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$$

Таблица 3.2. Результаты измерений

$l, \text{ м}$	Частота ГВЧ $f_1 =$				Частота ГВЧ $f_2 =$			
	$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	$\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$	$\alpha, \text{ dB}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	$\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$	$\alpha, \text{ dB}$
0								
.								
.								
.								

6. Построить график зависимости $\alpha = f(l)$ для частот f_1 и f_2 .

7. Рассчитать коэффициент затухания коаксиального на 1 м α , dB/м для частот f_1 и f_2 .

$$\alpha, \text{ dB/м} = \frac{\alpha}{l}.$$

3.3.3. Измерение параметров в волноводах. Волноводы – представляют собой полые металлические трубы различных поперечных сечений, внутри которых распространяются электромагнитные волны

Измерение коэффициента затухания в волноводах

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.3.

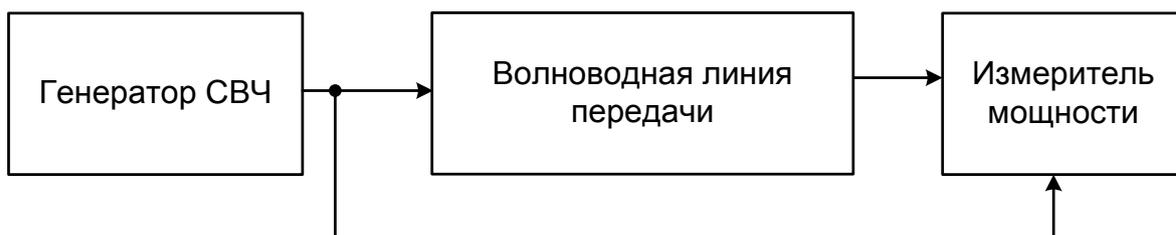


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой по исследованию коэффициента затухания в волноводе.
2. Подготовить к работе генератор СВЧ и измеритель мощности.
3. Снять показания мощности на входе и выходе волновода от его длины l .
4. Результаты измерений занести в табл. 3.3.
5. Рассчитать коэффициент затухания коаксиального кабеля в зависимости от его длины α , dB

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}}$$

6. Построить график зависимости $\alpha = f(l)$ для частот f_1 и f_2 .

7. Рассчитать коэффициент затухания коаксиального на 1м α , дВ/м для частот f_1 и f_2

$$\alpha, \text{дВ/м} = \frac{\alpha}{l}.$$

Таблица 3.2. Результаты измерений

l, м	Частота ГСВЧ $f_1 =$				Частота ГСВЧ $f_2 =$			
	$P_{\text{вх}}, \text{Вт}$	$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	$\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}$	$\alpha, \text{дВ}$	$P_{\text{вх}}, \text{Вт}$	$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	$\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}$	$\alpha, \text{дВ}$
0								
.								
.								
.								

Измерение КБВ в волноводной линии передачи

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.4.

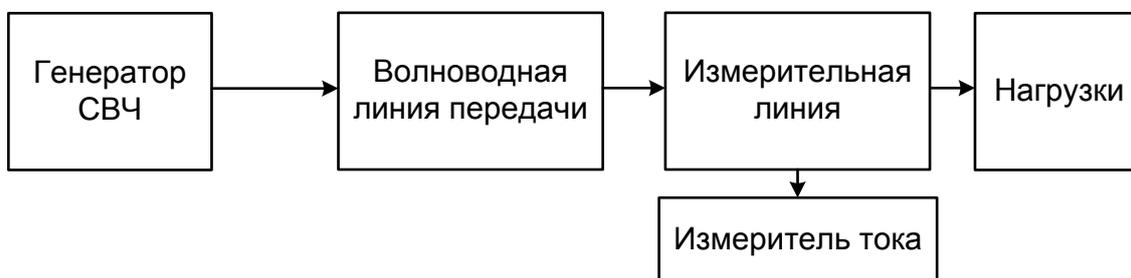


Рис.3.4. Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой по исследованию коэффициента затухания в волноводе.

2. Подготовить к работе генератор СВЧ, измеритель тока и измерительную линию.

3. Для определения коэффициента бегущей волны (КБВ) необходимо, перемещая каретку вдоль измерительной линии, отметить по шкале индикатора наименьшее I_{min} и наибольшее I_{max} показания тока.

4. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений

Тип нагрузки	Частота ГСВЧ $f_1 =$			Частота ГСВЧ $f_2 =$		
	I_{\max}, A	I_{\min}, A	КБВ	I_{\max}, A	I_{\min}, A	КБВ
1. Открытый конец волновода						
2. Рупор						
3. Поглотитель мощности						

5. Рассчитать коэффициент бегущей волны КБВ для частот f_1 и f_2

$$\text{КБВ} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}$$

3.4. Индивидуальные задания

Определяются преподавателем на занятиях.

3.5. Контрольные вопросы

1. Как строятся ваттметры поглощающей мощности СВЧ диапазона?
2. В чем заключается терморезисторный метод измерения мощности?
3. В чем заключается метод измерения мощности с помощью термопар?
4. На чем основан калориметрический метод измерения мощности?
5. Как работают ваттметры проходящей мощности?

Заключение

В представленном учебном пособии приводятся алгоритмы расчета основных параметров линий связи и устройств микроволновой техники, приведена методика измерений параметров СВЧ устройств. Рассмотрены физические процессы, описывающие особенности линий связи, устройств, методов измерения микроволновой техники.

Учебное пособие предполагает наличие у читателя знаний математики, электродинамики, распространения радиоволн, основ теории антенн. Однако изложение построено таким образом, что менее подготовленный читатель усвоит все необходимые понятия. Материал снабжен большим количеством рисунков и диаграмм. Данное учебное пособие будет полезно не только студентам, но и инженерно-техническим работникам, работающим в области радиотехники.

Список литературы

1. Григорьев, А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник / А.Д Григорьев. 2-е изд. СПб: Изд. "Лань", 2007.
2. Джуринский, К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микроразветвляющие переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех / К. Б. Джуринский. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Техносфера, 2006.
3. Максимов, В.М. Устройства СВЧ: основы теории и элементы тракта: Учеб. пособие для вузов / В. М. Максимов. - М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002.
4. Пудовкин, А.П., Панасюк Ю.Н, Иванков А.А. Основы теории антенн / А.П.Пудовкин, Ю.Н Панасюк, А.А. Иванков. Тамбов, ТГТУ, 2010.