МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

―МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСТЕТ РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ‖

Б.С.ЛОБАНОВ, Г.В. КУЛИКОВ, В.И.НЕФЕДОВ, А.И. ПИКУЛЬ, Н.А.ТРЕФИЛОВ

#### СВЕРВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Москва 2012

ББК 22.313 Л

УДК 537.8

Рецензенты: д.т.н., профессор В.М. Балашов

Б.С.Лобанов, Г.В. Куликов, В.И.Нефедов, А.И. Пикуль, Н.А.Трефилов Свервысокочастотные линии передачи: учебное пособие по курсовому проектированию / Федеральное государ- ственное бюджетное образовательное учреждение высшего про- фессионального образования «Московский государственный тех- нический университет радиотехники, электроники и автомати- ки».– М.: Изд-во МИРЭА, 2012 .– 80 с.

Учебное пособие предназначено для студентов радиотехни- ческих и телекоммуникационных направлений и специальностей ВУЗов. Рассматривается материал, входящий в федеральную ком- поненту дисциплин СВЧ тематики.

Рассмотрены необходимые теоретические положения по расчету линий передач, по согласованию линий с реальными ча- стотнозависимыми нагрузками, рассмотрены математические ме- тоды, применяемые для расчета, приведены справочные сведения о материалах линий передачи.

Для студентов вузов, магистрантов и аспирантов по направле- нию Радиотехника и направлению Инфокоммуникационные тех- нологии и системы связи, а также для инженерно – технических работников, специализирующихся в области антенн и устройств СВЧ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета университета.

ISBN 5-7339-0211-6 © Б.С.Лобанов, Г.В. Куликов, В.И.Нефедов, А.И. Пикуль,

Н.А.Трефилов

© МИРЭА, 2012

Борис Семенович Лобанов Геннадий Валентинович Куликов Виктор Иванович Нефедов Анатолий Иванович Пикуль Николай Александрович Трефилов

#### СВЕРВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Редактор Н.А. Трефилов

Учебное пособие напечатано в авторской редакции

Подписано в печать 00.00.2011. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л.00,00 Усл. кр.-отт. 00,00. Уч.-изд. л. 00,00 Тираж 000 экз. С 00

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования ―Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики‖ 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

#### СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| **ВВЕДЕНИЕ** | 6 |
| 1. **РЕЖИМЫ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ**    1. **Основные типы линий передачи**    2. **Режимы волн в волноводах**    3. **Согласование линий передач** 2. **МАТРИЦЫ И ГРАФЫ ДЛЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ**    1. **Матрицы рассеяния СВЧ устройств**   **2.2 Матрицы передачи СВЧ устройств**  **2.3. Ориентированные графы**   1. **ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**    1. **Расчет СВЧ линий передачи**    2. **Согласование нагрузки СВЧ линии передачи**    3. **Расчет частотной характеристики СВЧ тракта**    4. **Алгоритм выбора численных значений**   **для задания на курсовое проектирование**   1. **ИНСТРУКЦИЯ МГТУ МИРЭА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ**    1. **Общие требования к порядку выполнения и содержанию работы**    2. **Оформление работы**    3. **Защита работы 5 ПРИЛОЖЕНИЯ**   **Форма титульного листа курсового проекта (работы) Форма задания на курсовой проект (работу)**  **Рекомендуемая форма оборота листа задания на курсо- вой проект (работу)**  **Типовая форма протокола заседания комиссии по защите курсового проекта (работы)**  **Материалы для подложек полосковых волноводов AD-250, AD-270, AD-300, AD-320 и AD-350**  **Материалы для подложек полосковых волноводов AR1000 и AR600**  **Размеры прямоугольных волноводов** | 7  7  13  16  26  26  37  40  45  45  47  48  49  51  51  55  55  59  59  60  61  62  64  65  67 |

|  |  |
| --- | --- |
| **Размеры волноводных фланцев**  **Соединители радиочастотные коаксиальные (коаксиальные разъемы)**  **Коаксиальные кабели**  **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК** | 68  72  74  79 |

**ВВЕДЕНИЕ**

Курсовое проектирование линий передачи СВЧ энергии произ- водится в ряде дисциплин базовой и вариативной частей учебных планов бакалавриата и магистратуры направлений 210400 - Ра- диотехника и 210700 – Инфокоммуникационные технологии и си- стемы связи, а также ряда других направлений. Примерами таких дисциплин являются, например, Устройства СВЧ и антенны, Ли- нии связи, Среды связи и т.п. Стандартными задачами курсового проектирования зачастую являются расчет поперчных размеров волноводов различного вида, задачи согласования волноводов с нагрузками с наперед заданными характеристиками, расчет до- полнительных характеристик линий передачи.

В данном учебном пособии кроме типовых заданий предусмот- рено решение задач по согласованию реальных частотнозависи- мых нагрузок, рассмотрено определение частотных зависимостей нагруженных линий передачи, согласованных на определенных частотах.

В учебном пособии кратко изложен теоретический материал в виде разделов, необходмых для выполнения задач курсового про- ектирования, приведены справочные сведения по стандартам и материалам линий передач. Также приведен набор заданий для курсового проектирования и требования к оформлению курсовых проектов и работ, принятые в МГТУ МИРЭА.

Учебное пособие в основном ориентировано для использования студентами в ходе курсосого проектирования, но также будет по- лезно для подготовки к лабораторным работам и при освоении лекционного материала.

#### РЕЖИМЫ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЛИНИЯХ

**ПЕРЕДАЧИ**

##### Основные типы линий передачи

Свервысокочастотные линии передачи (или волноводы) приме- няются в технике СВЧ, антеннах, в системах связи как для пере- дачи электромагнитной энергии, сигналов между различными устройствами, так и в качестве элементов СВЧ устройств. Всего известно несколько десятков различных видов линий передачи, но основными, чаще всего применяемыми на практике, являются линии передачи в виде металлических пустотелых волноводов, коаксиальных кабелей и полосковых волноводов [1,2].

Выбор типа линий передачи в основном определяется использу- емым диапазоном рабочих частот, уровнем передаваемой мощно- сти и требованиями к допустимому уровню потерь мощности. Коаксиальные кабели используются в основном в метровом и де- циметровом диапазонах длин волн. Иногда они применяются в сантиметровом диапазоне длин волн. Полосковые волноводы в основном применяются в качестве элементов устройств СВЧ и антенн в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Металлические пустотелые волноводы обычно применяются в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Они ха- рактеризуются наибольшим допустимым уровнем передаваемой мощности и наименьшим удельным затуханием среди рассматри- ваемых типов волноводов. Коаксиальные волноводы позволяют передавать меньший уровень мощности и имеют более высокое затухание. Полосковые волноводы позволяют передавать очень низкий уровень мощности и имеют высокое удельное затухание, но характеризуются высокой технологичностью изготовления.

В каждом типе линий передачи теоретически могут существо- вать электромагнитные поля в виде волн различных типов. Все типы волн принято классифицировать по наличию у них про- дольных относительно оси линии передачи составляющих векто- ров напряженностей электрического и магнитного полей. Волны типа **Е** имеют только продольную составляющую вектора напря-

женности электрического поля. Волны типа **Н** имеют только про- дольную составляющую вектора напряженности магнитного по- ля. Волны типа **Т** не имеют продольных составляющих напря- женностей полей. Каждый тип волны также характеризуется це- лочисленными индексами, определяющими зависимость ампли- тудного значения напряженностей электромагнитного поля от ко- ординат поперечного сечения линии передачи, например, Н10, или в общем виде Нmn [1-3].

Электромагнитные колебания в линиях передачи в виде бегу- щей волны могут существовать только при выполении условия

*f > fкр*,

где *f* – частота электромагнитного колебания, *fкр* - критическая частота для данного типа колебания, зависящая от поперечных размеров волновода и типа колебания. Часто это условие записы- вают в виде для длин волн

*λ * *λкр*,

где *λ* и *λкр* длины волн электромагнитного колебания в вакууме на частотах *f* и *fкр* , соответственно. Если эти условия не выполняют- ся, электромагнитные колебания в линиях передачи находятся в закритическом режиме, который характеризуется чрезвычайно высоким уровнем удельного затухания, что неприемлемо для пе- редачи мощности. Численные значения критических частот и критических длин волн линий передачи определяются в электро- динамике.

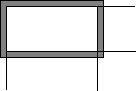
Для каждого вида линии передачи тип колебания, имеющий наибольшее численное значение критической длины волны, называется основным. Все остальные типы колебаний называют- ся высшими. Высшие типы колебаний обычно нумеруются в по- рядке возрастания критической частоты.

Рабочей областью для линии передачи называется диапазон длин волн или диапазон частот, в пределах которого в линии пе- редачи только основной тип колебания может существовать в ви- де бегущей волны. Очевидно, что рабочая область волновода вы- деляется условиями

*fкр.высш > f > fкр. осн* или *λкр.высш * *λ * *λкр.осн*,

где *fкр.высш* или *λкр.высш* критическая частота или критическая длина волны первого высшего типа колебания, *fкр. осн* или *λкр.осн* критиче- ская частота или критическая длина волны основного типа коле- бания. Передача мощности производится только в рабочих обла- стях линий передачи, поэтому приведенные условия являются условиями для расчета и выбора поперечных размеров волново- дов.

Основным типом колебания для прямоугольного волновода яв- ляется **Н10**. Для выбора сечения пустотелого прямоугольного вол- новода, показанного на рис.1.1



b

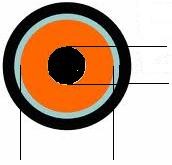
*a*

Рис.1.1 Поперечное сечение прямоугольного волновода

используются условия [1,2]

*λ > a > λ/2*, и *b ≈ a / 2*.

Основным типом колебания для коаксиального волновода явля- ется **Т**. Для выбора сечения коаксиального кабеля, показанного на рис. 1.2.



d

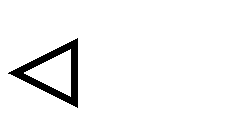
D

Рис.1.2 Поперечное сечение коаксиального кабеля (внешний слой –защитная оболочка, затем – наружный провод-

ник, диэлектрический изолятор, внутренний проводник)

используются условия [1-3]

**  *D*  *d*  2



**,

*W*  138 lg *D* ,



**

*d*

где *D* – внутренний диаметр наружного проводника кабеля (диа- метр межпроводникового изолятора), *d* – диаметр внутреннего проводника кабеля, *W* – волновое сопротивление кабеля, *ε* - ди- электрическая проницаемость изолятора.

Основным типом колебания для несимметричного полоскового волновода является квази **Т**. Для выбора поперечных размеров полоскового волновода, сечение которого показано на рис.1.3,



**

*t*

*h*

Рис.1.3 Поперечное сечение несимметричного полоскового вол- новода (нижний слой – проводящий экран, затем – диэлектриче- ский изолятор подложка, проводящая полоска)

используется условие [5]

**  2*d*1 1

*h*

**  2ln2*d*1 1

**  ** 1ln *d*1 1  0, 293  0,571 ** 

** 

*d*1  60** 2 *W* ,



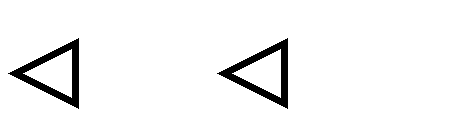
**

где *W* – волновое сопротивление полоскового волновода, *h* – тол- щина подложки, ** - относительная диэлектрическая проницае- мость подложки.

Для расчета других параметров и характеристик линий пе- редач используются приведенные ниже соотношения [1-4].

Прямоугольный волновод

Для волны основного типа Н10 размер широкой стенки удовле-



**0

2

*a *

0

творяет условию

. Размер

*b*  *a* . По этим соотношени-

2

ям размеры выбираются ориентировочно, затем они должны быть

уточнены, выбраны стандартные сечения волноводов по ГОСТ или по таблицам из 1, справочный материал приведен в прило- жении.



1 ** 2*a*2 



0

Длина волны типа Н10 в волноводе *â*  **0 / .

Фазовая постоянная для волновода

**  2** *â* .

Фазовая скорость *Vô*  ** ** .

Постоянная затухания

**0

** 2** 

*b*  **0 2 

 8,68

1  2*a* 

 **0 2

 

*b*

1  2



*a*  2*a* 

 дБ/м,



 

где  - проводимость материала стенок. Предельная мощность для волны Н10

1  2*a* 

 **0 2

 

2

*Pï ðåä*

 *ab*

4

*E W*

*ï ðî á* 0 ,

где *Епроб* – пробивная напряженность поля для воздуха, *W0* – вол- новое сопротивление воздуха.

Характеристическое (волновое) сопротивление волновода по току и напряжению

*Wui*  .

** *b*

2 *a*

**0

**0

1  **  2*a* 

1  **0 2

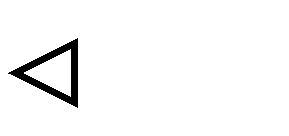
 

При конструировании устройств волноводы снабжают крпежны- ми контактными или дроссельными фланцами. Размеры фланцев приведены в приложении.

Коаксиальный кабель

Поперечные размеры проводников выбираются из условий:

**  *D*  *d*  2



**0 ,

*W*  138 lg *D* ,



**

*d*

где *D* и *d* – диаметры наружного и внутреннего проводников, *W* – характеристическое (волновое) сопротивление для волны **Т**, ** - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции. Попе- речные размеры должны быть откорректированы, выбран суще- ствующий кабель. Справочные данные по некоторым типам коак- сиальных кабелей приведены в приложении. Для соединения ко- аксиального кабеля с другими частями СВЧ тракта на концах ка- беля монтируются коаксиальные разъемы (соединители радиоча- стотные), которые выпускаются промышленностью для различ- ных типоразмеров коаксиальных кабелей. Справочные данные по некоторым типам коаксиальных разъемов приведены в приложе- нии.

Постоянная затухания

**  51,3 дБ/м,

2

1 *D d*

**0** *D*0 lg *D d* 

Предельная мощность

 *dEï ðî á* 2

*Pï ðåä*

  

lg *D d* .

 104, 4 

Несимметричный полосковый волновод

Ширина полоска ** определяется соотношением [5]

**  2*d*1 1

*h*

**  2ln2*d*1 1 ** 

,

** 1ln *d*1 1  0, 293  0,571 **  1 ** 

*d*1  60** 2 *W* ,



**

где *W* – волновое сопротивление, *h* – толщина подложки, ** - отно- сительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Постоянная затухания

**   91 ** *f tg* 1  *A* 1 / **  *A* 11  0,0114*rsl*  ,

   

 

где *A*  110*h * , *r*  *f W* , *s*  1 **

4*h*2 ,

*l*  *p*  *h* ln 2*h* / *t*   *t* / *h* / ** ,

*p*  1 *h* /** , *f* – частота в ГГц..

Фазовая постоянная

*ýô*

**  2**

**0 ,

где

*ýô*

 0,51 **  ** 1110*h * 1 2  .

Предельная мощность для полоскового волновода определяется электрическим и тепловым пробоем подложки и может быть рас- считана по таблицам из 2.

 

##### Режимы волн в волноводах

СВЧ мощность по линии передачи передается от генератора к нагрузке. Это можно показать схемой, приведенной на рис. 1.4.

волновод



Генератор нагрузка

плоскость начала

*z* отсчета координаты

Рис. 1.4. Схема передачи мощность по волноводу Мощность от генератора к нагрузке переносится бегущей вол-

ной, комплексную амплитуду напряженности электрического по- ля которой при отсутствии потерь в волноводе можно предста- вить в виде

*Eï àä*

 *E*0*e j* *z* .

Если нагрузка не согласована с линией передачи, часть мощно- сти отражается от нее и переносится в обратном направлении к

генератору отраженной волной. Комплексную амплитуду напря- женности электрического поля отраженной волны при отсутствии потерь в волноводе можно представить в виде

*Eî ò ð*

 *í E*0*e* *j* *z* ,

где

*í*  *í*

*e jí*

* комплексный коэффициент отражения нагруз-

ки, *φн*.= фаза коэффициента отражения нагрузки.

Падающая и отраженные волны интерферируют в линии переда- чи и суммарная комплексная ампитуда поля будет равна





*E*  *E*0*e j* *z*  *í E*0*e* *j* *z*

 *E*0 1 *í*

*e j* *z*  *í*

*e j* *z*  *e* *j* *z* *jí*

.

Выражение, стоящее в последнем члене в круглых скобках можно преобразовать к более удобному виду

*e j* *z*  *e* *j* *z* *jí*   *e jí* 2 *e j* *z* *jí* 2  *e* *j* *z* *jí* 2  

 2*e jí*

2 cos** *z*  *í*

2.

Тогда суммарное поле в волноводе равно

*E*  *E*0 1 *í*





*e j* *z*  *í*

2*e jí*

2 cos** *z*  *í*

2.

Суммарное поле в волноводе зависит от значения модуля коэф- фициента отражения нагрузки, который не может превосходить единицу в пассивных устройствах. Теоретически могут встре- чаться 3 случая [3, 8, 9]. Рассмотрим их.

Случай 1. Пусть *í*

=0. Тогда

*E*  *Eï àä*

 *E*0*e j* *z* .

При этом амплитуда суммарного поля постоянна в пределах всей линии передачи. Это показано на рис. 1.5 а). Такой характер пове- дения амплитуды суммарного поля в волноводе называется режи- мом бегущих волн или режимом полного согласования.

Случай 2. Пусть *í*

=1. Тогда

*E*  *E*0 *í*

2*e jí*

2 cos** *z*  *í*

2.

При этом бегущая волна в волноводе отсутствует. Суммарное по- ле является полем стоячей волны и амплитуда суммарного поля в волноводе изменяется так, как показано на рис. 1.5. б). Такой ха-

рактер поведения амплитуды суммарного поля в волноводе назы- вается режимом стоячих волн или режимом полного рассогласо- вания.

Случай 3. Пусть 1> *í*

>0. Тогда суммарное поле в волноводе бу-

дет описываться исходным выражением и состоять из поля бегу- щей волны с амплитудой

*E**áâ*  *E*0 1 *í* 

и поля стоячей волны с амплитудой

*E*  *E*0  *í*

2 cos** *z*  *í*

2 .

График амплитуды такого поля в волноводе показан на рис. 1.5 в).

|EΣ|

а) z



|EΣ|

z

б)

λв/2

|EΣ|

z

в)

Рис. 1.5. Графики изменения амплитуды суммарного поля в волноводе в различных режимах

Такой характер поведения амплитуды суммарного поля в волно- воде называется смешанным режимом или рассогласованным ре- жимом.

Режим поля в волноводе может быть измерен в результате экс- перимента с применением измерительной линии.

Количественно режим поля в волноводе полностью определяет-

ся комплексным значением *í*

 *í*

*e jí*

, но на практике удобнее

бывает пользоваться величиной коэффициента стоячей волны (КСВ), определяемой непосредственно из результатов измерений

*ÊÑÂ*    .

*E**ì àêñ*

*E**ì èí*

1 *í*

1 *í*

|  |  |
| --- | --- |
| *Eï àä*  | *Eî ò ð* |
| *Eï àä*  | *Eî ò ð* |

При этом, однако, для полного определения режима необходимо также измерять положение узлов стоячей волны в волноводе.

##### Согласование линий передач

Рассогласование линий передач приводит к ряду негативных яв- лений:

* + уменьшается мощность, выделяемая в нагрузке, снижается КПД линий передачи;
  + отраженные волны вызывают увеличение нестабильностей генератора по частоте и выходной мощности;
  + появляются искажения передаваемых сигналов;
  + уменьшается допустимая передаваемая мощность для ли- нии передачи.

Для уменьшения рассогласования используются методы уменьшения амплитуды отраженной волны за счет ее подавления или за счет ее компенсации, которые подразделяются на методы узкополосного согласования (согласование в полосе частот по- рядка 5% от несущей частоты) и широкополосного согласования.

Согласование за счет подавления отраженной волны произво- дится дополнительными СВЧ устройствами вентилями и аттеню- аторами, устанавливаемыми в линии передачи между нагрузкой и генератором. Такие устройства устраняют воздействие отражен-

ных волн на генератор, но не уменьшают другие негативные яв- ления, поэтому применяются обычно в радиоизмерениях и для защиты автогенераторов СВЧ.

Для узкополосного согласования используются реактивные согла- сующие устройства, устанавливаемые в линию передачи близко к рассогласованной нагрузке, устройства, применяемые для согла- сования перечислены в табл. 1.1 [3, 8, 9].

Таблица 1.1 Виды согласующих устройств для узкополосного согласования

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Типы согласующих устройств | Типы линий передач | | |
| прямо- угольный  волновод | коаксиаль- ный волно-  вод | несимметрич- ный полоско-  вый волновод |
| Индуктивная диа-  фрагма (параллель- ная) | + | - | - |
| Емкостная диа- фрагма (параллель-  ная) | + | - | - |
| Индуктивный штырь (параллель-  ный) | + | - | - |
| Емкостной штырь  (параллельный) | + (редко) | - | - |
| Параллельный  шлейф | + | + | + |
| Последовательный  шлейф | + |  |  |
| Четвертьволновый трансформатор  (последовательный) | + | + | + |

Реактивные согласующие устройства не потребляют СВЧ энер- гию и не снижают КПД линий передач при согласовании. Согла- сующие элементы включаются в линию передачи по параллель- ной или последовательной схеме в зависимости от их типа. Реак-

тивные параметры согласующих элементов, нормированные к ве- личине волнового сопротивления ***Wв*** или волновой проводимости *Yв=1/ Wв* волновода зависят от их размеров, они приведены в табл. 1.2 [8].

Таблица 1.2 Реактивные параметры согласующих элементов

|  |  |
| --- | --- |
| Типы согласую-  щих устройств | Нормированная реактивность |
| Симметричная ин- дуктивная диа-  фрагма | *Â*  *jâ ctg* 2  ** *a*   *a*  2 *a*     |
| Несимметричная индуктивная диа- фрагма | 1 sec2  ** *a*  *ctg* 2 ** 1   *a*   *j*   2 *a*    2*a*   *Â*  *â*        *a tg* 2  ** *a*    2 *a*     |
| Симметричная ем-  костная диафрагма | *Â*  *j* 4*b* ln csc ** *b*   *â*  2 *b*     |
| Несимметричная  емкостная диа- фрагма | *Â*  *j* 4*b* ln csc ** *b* sec ** *b*   *â*  2 *b*  2 *b*      |
| Индуктивный штырь |    *ja*  1   *Â*      *â*  2  **  *d*    4*a*  **  *d*     sec   *x*   ln  cos  *x*        *a*  2   ** *d*  *a*  2    |
| Параллельный  шлейф | *Z*  *jñtg*  2** *l*    *â*     |
| Последовательный  шлейф | *Â*  *jtg*  2** *l*    *â*     |

Реактивные согласующие элементы согласуют реактивные па- раметры нагрузки. Согласование активных параметров нагрузки достигается выбором места включения согласующего элемента. Расчет согласования параллельных согласующих устройств про-

изводится по параллельной схеме, для последовательных согла- сующих устройств – по последовательной схеме.

Эскизы согласующих элементов показаны на риc.1.6., затемнени- ем показаны проводящие элементы.



a’

a



a’

a



b’

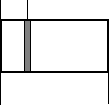
b

а) б) в)



b’

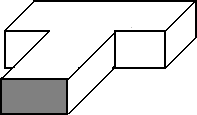
b

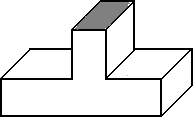


x

d

a

г) д)



*l*

е) ж)

*l*

Рис. 1.6. Эскизы согласующих элементов

а) симметричная индуктивная диафрагма; б) несимметричная ин- дуктивная диафрагма; в) симметричная емкостная диафрагма; г) несимметричная емкостная диафрагма; д) индуктивный штырь; е) параллельный волноводный шлейф; ж) последовательный вол- новодный шлейф.

Четвертьволновый трансформатор согласует активную состав- ляющую сопротивления нагрузки. Он включается по последова- тельной схеме. Реактивная составляющая сопротивления нагруз- ки достигается выбором места включения четвертьволнового трансформатора.

Волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора равно *Wòð*  , где *W1 иW2* – волновые сопротивления волно- водов, подключенных к выходам трансформатора Длина транс- форматора равна четверти длины волны в волноводе, образую- щем трансформатор.

*W*1*W*2

Расчет согласования для простой схемы, показанной на рис. 1.4,

при последовательной схеме согласования производится по фор- мулам

*Z*  *W Zí*

* *jWtg* 2** *l*

*â*   *R*

* + *jX* ,

*âõ W* 

*jZí tg* 2** *l*

*â* 

*âõ âõ*

где

*Zâõ* - входное сопротивление волновода на расстоянии *z=l* от

нагрузки,

 *Zâõ* *W* ,

*Zâõ*  *W*

где Г – комплексный коэффициент отражения в сечении линии

передачи, в котором определено

*Zâõ* .

Отсюда следует, что полное согласование будет достигнуто, ес- ли на расстоянии *lc* от нагрузки, на котором

*Zâõl*  *W*  *jXâõl*

включить последовательно согласующий элемент, например по- следовательный шлейф, имеющий входное сопротивление

*Zñî ãë*

 *jXâõl* ,

тогда входное сопротивление нагрузки вместе с согласующим элементом будет равно *W* и общий коэффициент отражения будет равен нулю.

Также можно достичь согласования, если на расстоянии *lc* от нагрузки, на котором

*Zâõl*  *Râõl*

включить четвертьволновый трансформатор, имеющий волновое сопротивление

*Wò ð*  ,

*WRâõl*

где *W* – волновое сопротивление входной линии передачи.

Расчет согласования для согласующих элементов, включаемых по параллельной схеме, например диафрагмы, штыри, параллель- ные шлейфы, несколько иной. Вначале сопротивление нагрузки должно быть пересчитано в комплексную проводимость нагрузки

*Y*  1  *G*  *jB* .

*í Zí í í*

Дальнейший расчет проводится по формулам

*Y*  *Y*

*Yí* 

*jYâtg* 2** *l*

*â*   *G*

* + *jB* ,

*âõ â Yâ* 

*jYí tg* 2** *l*

*â* 

*âõ âõ*

где

 *Yâ*  *Yâõ* ,

*Yâ*  *Yâõ*

*Yâõ* - входная проводимость нагрузки на расстоянии *l* от места

включения нагрузки.

Отсюда следует, что полное согласование будет достигнуто, ес- ли на расстоянии *lc* от нагрузки, на котором

*Yâõl*

 *Yâ* 

*jBâõl*

включить последовательно согласующий элемент, например по- следовательный шлейф, имеющий входную проводимость

*Bñî ãë*

 *jBâõl* ,

тогда входная проводимость нагрузки вместе с согласующим эле-

ментом будет равна *Yâ*

равен нулю.

и общий коэффициент отражения будет

Для расчета согласования таким способом необходимо решить трансцендентное уравнение и иметь хорошие навыки работы с комплексными числами. При наличии вычислительной техники, использующей, например, пакет Mathcad, это не является про- блемой, но в начале развития СВЧ техники это вызывало опреде- ленные трудности. Для преодоления их американцем Смитом в 1939 г. и независимо от него российским инженером А. Р. Воль-

пертом в 1940 г. был предложен графический калькулятор, кото- рый сейчас называется диаграммой Смита-Вольперта, предназна- ченный для расчета согласования [3, 9]. Диаграмма, показанная на рис. 1.7, представляет собой две совмещенные нормированные диаграммы – диаграмму режимов в линии передачи и диаграмму полных сопротивлений. Все расстояния в линии передачи норми- руются к длине волны в волноводе, полные сопротивления и пол- ные проводимости нормируются к волновому сопротивлению волновода или волновой проводимости волновода, соответствен- но.

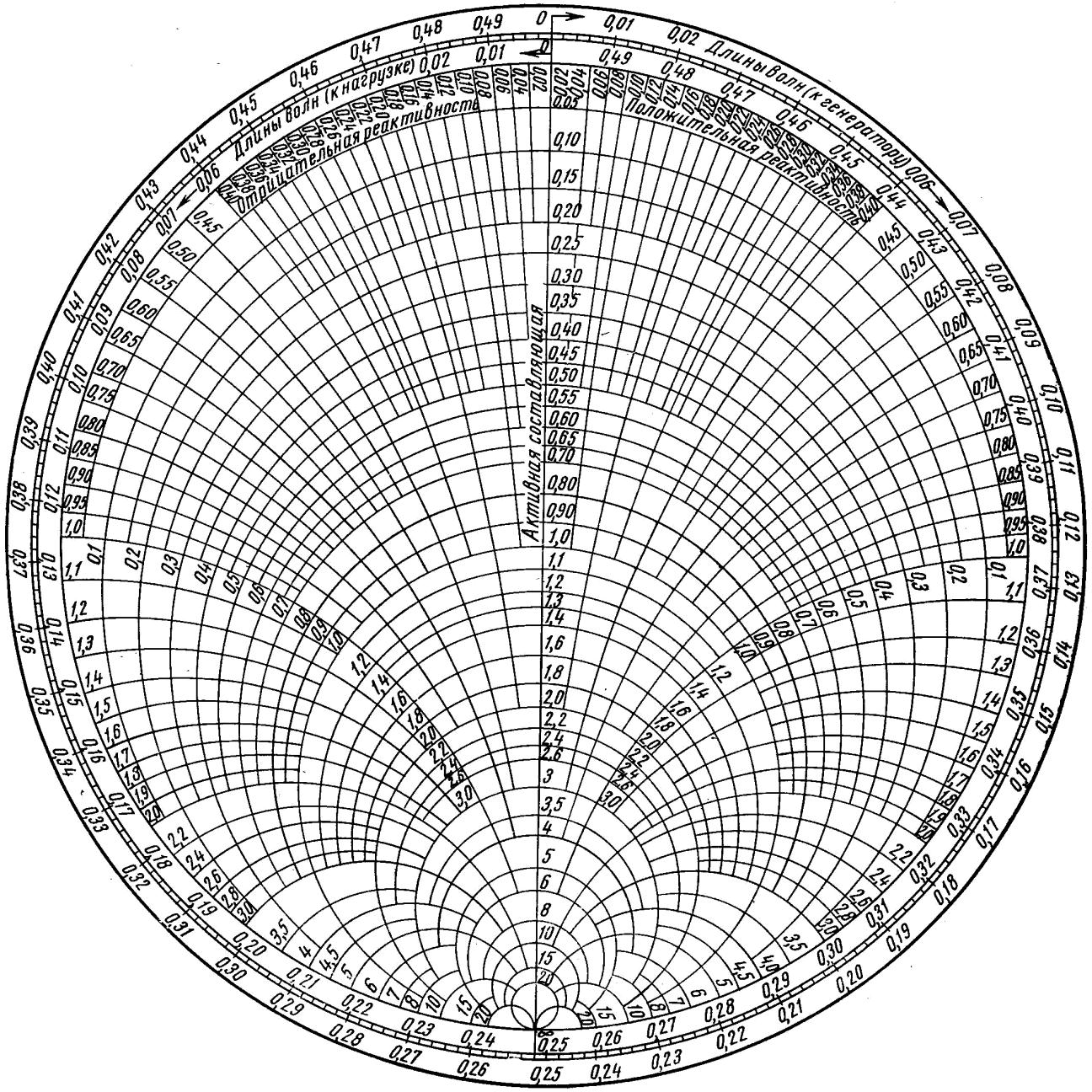


Рис. 1.7. Диаграмма Смита – Вольперта

Для упрощения рисунка на нем не показаны концентрические окружности равных значений КСВ или модуля коэффициента от- ражения. Также по краю диаграммы не показана шкала фаз коэф- фициентов отражения, расположенная по краю диаграммы. Нуле- вое значение фазы находится в нижней точке на краю диаграммы, отсчет производится против хода часовой стрелки.

Рассмотрим расчет согласования с использованием диаграммы на нескольких примерах.

Пример 1. Пусть известны размеры волновода и импеданс нагрузки *Zн*. Необходимо рассчитать согласование нагрузки по- следовательным шлейфом. По приведенным выше формулам необходимо вычислить волновое сопротивление волновода *W* и выполнить нормировку, вычисляя отношение

*Zí í*

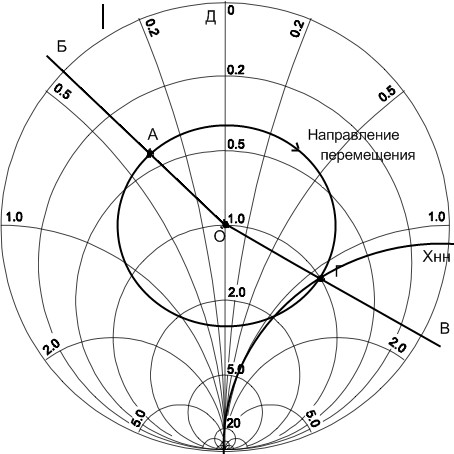
 *Zí*

*W*  *Rí í*

* *jXí í* .

На пересечении линий, соответствующих численным значениям

*Ríí* и *Xíí* , на диаграмме откладывается точка *А*, (см. рис. 1.8.)*.*



*l1*

*l2*

Рис. 1.8. Расчет по диаграмме задачи примера 1

Через центр диаграммы *О* и точку *А* проводится линия до края диаграммы и отмечается точка *Б* на краю диаграммы. Затем стро- ится окружность радиусом *ОА* с центром в точке *О* и определяет- ся положение точки *Г*, являющейся точкой пересечения постро- енной окружности с линией активных нормированных сопротив- лений, равных 1. Через точки *О* и *Г* проводится прямая линия до пересечения с краем диаграммы и определяется положение точки *В* на краю диаграммы. Отмечается линия равных значений реак-

тивных нормированных сопротивлений, проходящая через точку *Г* и по надписи на линии определяется значение *Хнн*. Затем опре- деляется расстояние от нагрузки до места включения последова- тельного шлейфа. Это расстояние равно сумме расстояний *l1* от точки *Б* до точки *Д*, расположенной на самом верху края диа- граммы, и расстояния *l2* от точки *Д* до точки *В*

*lc*  *l*1  *l*2 .

Последним построением определяется длина короткозамкнуто- го шлейфа. Такой шлейф имеет нулевое активное сопротивление, поэтому точки, характеризующие его входное сопротивление рас- положены на линии, совпадающей с краем диаграммы. Для шлейфа нулевой длины точка, характеризующая его входное со- противление совпадает с точкой *Д*. При удалении от короткоза- мыкателя точка на диаграмме, характеризующая его входное со- противление, будет перемещаться по направлению к генератору по ходу часовой стрелки и наконец достигнет значения *–Хнн*. Нормированная длина шлейфа равна расстоянию, на которое пе- ремещается точка по краю диаграммы от исходного положения (точки *Д*). Но, учитывая симметрию диаграммы относительно вертикальной оси и то, что общая нормированная длина перимет- ра диаграммы составляет 0,5, общую длину шлейфа можно найти по соотношению

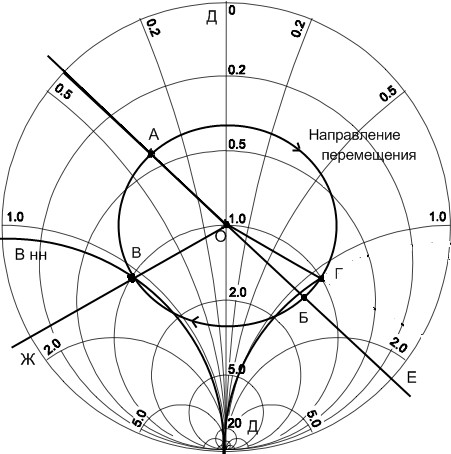
*løë*  0,5  *l*2 .

Задача полностью решена. Найдено расстояние от нагрузки до места включения согласующего последовательного шлейфа и длина шлейфа, при которой его реактивное сопротивление ком- пенсирует реактивное сопротивление нагрузки.

Пример 2. Рассмотрим решение предыдущей задачи, если со- гласование выполняется емкостной диафрагмой.

Вначале необходимо отметить, что диафрагма включается по параллельной схеме и ее реактивная проводимость является по- ложительной. Отсюда следует, что расчет согласования должен выполняться по параллельной схеме а расстояние, на котором устанавливается диафрагма, должно быть таким, чтобы величина *Ввх* была отрицательной.

Построения, связанные с расетом, показаны на рис. 1.9.



*l2*

*l1*

Рис. 1.8. Расчет по диаграмме задачи примера 2

Начальный этап построения точки *А* на диагамме выполняется так же, как в примере 1. После этого производится пересчет нор- мированного сопротивления нагрузки в нормированную прово- димость нагрузки. Для этого проводится окружность радиусом *ОА* с центром в точке *О*, Линия, соединяющая точки *А* и *О* про- дляется до пересечения с построенной окружностью в точке *Б* и до пересечения с краем диаграммы в точке *Е*. Точка *Б* при этом диаметрально противоположна точке *А* и соответствует нормиро- ванной проводимости нагрузки. Определяются точки пересечения построенной окружности с линией активных нормированных проводимостей равных 1. Такими точками являются точки *В* и *Г*. В точке *Г* входная реактивная проводимость нагрузки является положительной, поэтому ее невозможно скомпенсиировать реак- тивной проводимостью емкостной диафрагмы. Точка *Г* отбрасы-

вается, выбирается точка *В*. Из центра диаграммы точки *О* прово- дится прямая линия до пересечения с краем диаграммы в точке *Ж*. Кроме того, с линии равных реактивных проводимостей, про- ходящей через точку *В,* отсчитывается значение реактивной нор- мированной входной проводимости нагрузки в точке *В*.

Нормированное расстояние между нагрузкой и местом включе- ния согласующей диафрагмы равно расстоянию от точки *Е* до точки *Ж* по краю диаграммы и может быть найдено по соотноше- нию

*lc*  *l*1  *l*2 .

Нормированная реактивная проводимость согласующей диафраг- мы равна – *Внн*. Задача полностью решена. Осталось определить размеры диафрагмы по формуле из табл. 1.2.

Для решения задач согласования сложных схем и для построе- ния зависимости величин, характеризующих затухание, от часто- ты рассмотренные способы расчета согласования не удобны. Для таких целей используются методы расчета, основанные на при- менении матриц рассеяния, матриц передачи или ориентирован- ных графов.

##### МАТРИЦЫ И ГРАФЫ ДЛЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ 2.1.Матрицы рассеяния СВЧ устройств

Входы СВЧ устройств могут быть волноводами разных ти- пов или в них могут существовать волны разных типов. Поэтому обычные напряжения, действующие на входах не применимы для описания таких устройств. Рассмотрим пример. Пусть две линии передачи, имеющие различные волновые сопротивлени, согласо- ваны устройством без потерь, как показано на рис. 2.1. При этом мощность из первой линии полностью передается во вторую, но напряжения, действующие на входах не равны друг другу.

|  |  |
| --- | --- |
|  | *W*1  *W*2 |

*PВХ*

 *PВЫХ*

2

 1

*u*

2*W*1

2

 2

*u*

2*W*2

*u*1   1

*W*1 *W*2

*u*2

Рис. 2.1. Пояснение необходимости нормировки волн

Для аналитического описания многовходовых устройств необходима специальная нормировка . Применяется нормировка по мощности. Под амплитудой волны понимается величина

*E*0  ,где *P* – мощность, переносимая волной. Фаза волны –

2*P*

является реальной фазой колебания. Необходимо отметить, что фаза волн зависит от выбора плоскостей отсчета фаз на выходах устройства. При перемещении плоскостей отсчета фаз изменяют- ся их фазы.

Если нормированная комплексная амплитуда волны на входе

устройства записана в виде

*E* 

*E*0 *e j* , то из этого следует [6-9]

*E*  *E* \*  

*E* 2

*P*

2 2

С учетом такой нормировки при переходе к эквивалентным

длинным линиям получается ряд следствий:

* волна единичной амплитуды переносит мощность 1/2;
* характеристическое сопротивление эквивалентной длин- ной линии при такой нормировке равно единице;
* величины токов и напряжений в эквивалентной длинной

линии

*u*  *i* 

*E*0 ;

* знак тока связан с направлением движения волны, для встречных направлений знаки различны.

Для введения понятия матрицы рассеяния рассмотрим мно- говходовое устройство.

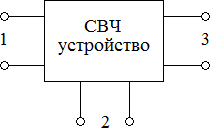


Рис.2.1. Многовходовое СВЧ устройство

Для различения входов введем их нумерацию. На каждом волноводном входе могут существовать прямые и обратные вол- ны. Для их различения дадим определение:

* *ai* – падающая волна, существующая на *i*-ом входе – это волна, переносящая мощность внутрь устройства;
* *bi* – отраженная волна, существующая на *i*-ом входе – это волна, переносящая мощность из устройства.

Для линейного СВЧ устройства взаимная связь всех волн *ai*, *bi* может быть описана системой линейных алгебраичесих урав- нений. Систему уравнений можно записать различными спосо- бами [6-9].

При введении понятия матриц рассеяния рассматривается система уравнений, разрешенная относительно отраженных (рас- сеянных волн)

|  |  |
| --- | --- |
| *b*1  *S*11*a*1  *S*12*a*2  *S*13*a*3,    *b*2  *S*21*a*1  *S*22*a*2  *S*23*a*3,  *b*3  *S*31*a*1  *S*32*a*2  *S*33*a*3.   | (1) |

Эту систему можно записать в матричном виде

|  |  |
| --- | --- |
| *b*1  *S*11*S*12*S*13  *a*1   *b*  *S*  *a*  *b*2   *S*21*S*22*S*23   *a*2          *b*3  *S*31*S*32*S*33  *a*3  | (2) |

Матрица коэффициентов [S] называется матрицей рассеяния СВЧ устройства. Еще раз отметим, что вид матрицы рассеяния зависит от выбора плоскостей отсчета фаз на выходах устройства.

Рассмотрим основные свойства матриц рассеяния (МР). Определим физический смысл элементов МР. Для этого прове-

дем ряд мысленных опытов над СВЧ устройством.

Опыт 1.

Подключим ко входу 1 согласованный генератор, а к осталь- ным входам подключим согласованные нагрузки (СН) (это озна- чает, что мощности *bi* гасятся в нагрузках и нагрузки не являются генераторами, соответственно *ai*=0).

Исходная система сведется только к одному уравнению, имеющему вид

*b*  *S a*  *S*

 *b*  *Г* ,

1 11 1

11 *a*1 1

где *Г1* – коэффициент отражения по напряжению от входа 1, при условии, что к остальным входам подключены СН.

Обобщая, получаем *Sii*  *Гi* , то есть, элементы главной

диагонали матрицы рассеяния численно равны коэффициентам отражения от соответствующих входов СВЧ устройства пр усло- вии, что ко всем остальным входам пдключены СН.

Опыт 2.

Подключим ко входу 1 согласованный генератор, а ко входу 2 – согласованный измеритель. К остальным входам подключим согласованные нагрузки. Тогда исходная система уравнений при- мет вид

*b*  *S a*  *S*

 *b*2  *T* ,

2 21 1

21 *a*1 12

где *Т12* – коэффициент передачи со входа 1 на вход 2.

Обобщая, получим *Sik*  *Tki* , то есть, внедиагональные чле-

ны матрицы рассеяния СВЧ устройства

*Sik* численно равны коэф-

фициентам передачи подключены СН.

*Tki*

при условии, что к остальным входам

В основном СВЧ устройства являются взаимными, т.е. для

них выполняется условие *Tik*  *Tki* . Для таких устройств в матри-

цах рассеяния будут равны элементы, расположенные симмет-

рично относительно главной диагонали. называются симметрическими.

Опыт 3.

*Sik*

 *Ski*

– такие матрицы

Ко входу 1 подключим согласованный генератор, создающий волну *a1*, а к остальным входам подключим согласованные изме- рители, измеряющие волны *bi*. При этом исходная система урав- нений примет вид

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *b*1  *S*11*a*1    *S a* ,  *b*2 21 1  *b*3  *S*31*a*1   | при этом, | *b*1  *S*11  *a*1  *b*2  *S*21  *a*1 *b*3  *S*31  *a*1 |  |

Если возвести в квадрат правые уравнения и сложить их и разделить на 2, то

 

*b1 2*

*b2 2*

### *2 2 2*

*b3 2*



  *S11 2* 

*S21 2* 

*S31*

*2* 

 *2*

*a1 2*

Из условия нормировки волн следует

где





*Рвых1*  *Рвых2*

* *Рвых3*

  *S11 2* 

*S21 2* 

*S31 2* *Рвх1*

*PВЫХ1 + PВЫХ2 + PВЫХ3* – мощности, выходящие из выходов устройства;

*PВХ1* – мощность, входящая в устройство.

Для пассивного устройства PВЫХ≤PВХ. Если потери в устрой- стве отсутствуют PВЫХ=PВХ. Таким образом

2

2

*S*11 

2

*S*21 

*S*31  1

Для устройства без потерь:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *S* 2  *S* 2  *S* 2  1  11 21 31 | или | *S*11*S*\*  *S*21*S*\*  *S*31*S*\*  1  11 21 31 |

Обобщая получаем: для устройств без потерь сумма квадра- тов модулей элементов любой строки или столбца МР равна 1. Такие матрицы в математике называются унитарными, они имеют следующее основное свойство:

[S]-1=[S\*]t ,

используя его, можно записать

[S\*]t[S]=[I] и [S][S\*]t=[I],

где [I] – единичная матрица.

Для матрицы двухвходового устройства, соответствующей вол- новоду, такие матрицы будут иметь вид

 *S*11



[*S* ] 

*e j*11

*S*12

*e j*12



 [*S*\*]*t*

.

 *S*11 *e* *j*11 *S*12 *e* *j*12 

  

 *S*21

*e j*21

*S*22

*e j*22  ,

 *S*21 *e* *j*21 *S*22 *e* *j*22 

Перемножая матрицы, и приравнивая соответствующие элементы матрицы произведения и единичной матрицы, запишем четыре равенства

*S*11 *e j*11

*S*21 *e j*21 *S*11 *e j*11 *S*21 *e j*21

*S*11 *e* *j*11 

*S*21 *e* *j*11  *S*11 *e* *j*21  *S*21 *e* *j*21 

*S*12 *S*22 *S*12

*S*22

*e j*12

*e j*22 *e j*12 *e j*22

*S*12 *S*22 *S*12

*S*22

*e* *j*12

*e* *j*22 *e* *j*12 *e* *j*22

 1,

 0 ,

 0 ,

 1.

Обобщая, получаем два основных свойства унитарных матриц

 *Sik*

## 2  1

 *S S*\*

##  0

*i* **** *k*

*ik ek* 

 *Sik*

*k*



## 2  1

 и

\*

*ik ek*

 *S S*

*i*



##  0

.



Рассмотрим, как изменяется МР при простейших видоизмене- ниях СВЧ устройства. Считаем, что исходная МР имеет вид

*S* ' 

 *S*11

*S*21

*S*12 *S*22

*S*13 

*S*23  ,

 

*S*31 *S*32 *S*33 

Пример 1. Пусть ко входу 1 подключен удлинитель – согласо- ванный волновод длиной *l*. Все волны, проходящие через вход 1 получат дополнительный сдвиг по фазе *φ=-βl*, где *β=2π/λв*. Волна, отраженная от первого входа проходит этот волновод дважды, по- этому получит фазовый сдвиг *2φ*. Таким образом

*T*1*i*

' *T*1*i*

*e j*

*Ã*1 ' 

*Ã*1*e j* 2**

*Si*1' *Si*1*e j*

*S*11 ' 

*S*11*e j* 2** .

Учитывая это, для матрицы рассеяния видоизмененного устрой- ства можно записать

*S*11*e j* 2**

*S*12

*S*13 

*S* '   *S*



21*e j*

*S*22



*S*23 

,



 *S*31*e j*



если устройство взаимное,то

*S*11*e j* 2**

*S*32

*S*12*e j*

*S*33 

*S*13*e j* 

*S* '   *S*



21*e j*

*S*22



*S*23 .



 *S*31*e j*



*S*32

*S*33 

Обобщая получаем: при подключении удлинителя ко входу "*i*" устройства, все элементы МР, стоящие в "*i*" строке и "*i*" столб- це умножаются на *ejφ* (элемент, стоящий на пересечении "*i*" стоки и "*i*" столбца умножается на *ejφ* дважды, т.е. на *ej2φ*). Такое преоб- разование очевидно, его также можно записать в виде матричной операции.

Пример 2. Пусть ко входу 1 устройства подключена согласован- ная нагрузка. При этом *a1*=0 и *b1* – поглощается нагрузкой. Ис- ходная система уравнений примет вид

*b*1  *S*11*a*1  *S*12*a*2  *S*13*a*3 *b*2  *S*21*a*1  *S*22*a*2  *S*23*a*3 *b*3  *S*31*a*1  *S*32*a*2  *S*33*a*3

или в матричном виде

 *S*11

*S*12

*S*13  *S S* 

*S* ' 

*S*21

*S*22

*S*23   

22 23 .



*S*31

*S*32

 *S*32

33 

*S*33 

Порядок матрицы рассеяния понизился, при этом индексы элементов являются нестандартными, при необходимости можно выполнить перенумерацию входов устройства.

*S* 

Обобщая получаем: при подключении ко входу "*i*" устрой- ства согласованной нагрузки в МР исчезают *i* – строка и *i* – стол- бец. Оставшиеся входы СВЧ устройства могут быть перенумеро- ваны.

Пример 3. Пусть ко входу 1 СВЧ устройства подключена отра- жающая нагрузка, имеющая коэффициент отражения *ГН*. Тогда исходная система уравнений примет следующий вид, если учесть, что *a1*=ГН*b1*

*b*1



 *S*11*ГН b*1  *S*12*a*2  *S*13*a*3

*b*2

*b*3



 *S*21*ГН b*1  *S*22*a*2

 *S*31*ГН b*1  *S*32*a*2

 *S*23*a*3

 *S*33*a*3

*b*  *S*12*a*2  *S*13*a*3

отсюда

1 1 *S*11*ГН*

.

Преобразуем второе и третье уравнения, подставляя в них значе- ния *b1*

*b* 

*S*21*ГН S*12*a*2

* *S*21*ГН S*13*a*3  *S*

*a*  *S a*

 2 1  *S*11*ГН*

1  *S*11*ГН*

22 2

23 3

 *S Г S a*



### *S Г S a*

или

*b*3

 31 *Н* 12 2

1  *S*11*ГН*

 31 *Н* 13 3

1  *S*11*ГН*

 *S*32*a*2

 *S*33*a*3

  *S*21*ГН S*12

  *S*21*ГН S*13 

*b*2  

1  *S*

 *S*22 *a*2

 

1  *S Г*

 *S*23 *a*3

  11   11 *Н* 

  *S Г S*   *S Г S* 

*b*3   31 *Н* 12  *S*32 *a*2  

31 *Н* 13  *S*33 *a*3

 1  *S*11*ГН*

 1  *S*11*ГН* 

Переходя к матричному виду, получаем

 *S*21*ГН S*12  *S S*21*ГН S*13  *S* 

  

1  *S*11

22 1  *S*11

23 

*S* '   *S Г S*

*S Г S* 

 31 *Н* 12

 *S*32

31 *Н* 13

 *S*33 

 1  *S*11

1  *S*11

 .

Рассмотрим матрицы рассеяния простейших устройств, необхо- димые для курсового проектирования:

* регулярный волновод без потерь

|  |  |
| --- | --- |
|  |    0 *e* *j* 2*l*   *S*    *jl*   *e* 0  ; |

* регулярный волновод с потерями

|  |  |
| --- | --- |
|  |    0 *e*2*le* *j* 2*l*   *S*   2*l*  *jl*   *e e* 0  ; |

* скачок сечения волноводов бесконечно малой длины

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Очевидно | *Г*  *W*2  *W*1 ; *Ã*  *W*1 *W*2 ;  1 *W*2  *W*1 2 *W*1  *W*2  *Ã*1  *Ã*2; |

*T*12 



*T*21  

1  *Г* 2

1

1 *Г* 2

2

 4*W*1*W*2

*W*1  *W*2 ,

 *W*  *W* 2

 2 1 

 *W*2  *W*1 

 *T*12 ,

1 *Г* 2

1

*S*   1 *W*2

 *W*1 

*W*1  *W*2 4 *W*  *W* 

4*W*1*W*2

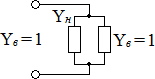
*W*1*W*2

 1 2  ;

* отрезок волновода бесконечно малой длины, зашунтированный реактиной проводимостью *Y=jB*

|  |  |
| --- | --- |
|  | Эквивалентная схема такого устройства имеет вид |

Пронормируем элементы на величину волновой проводимости

*Y*  *Y*

*н Yв*

.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Коэффициент отражения от входа |
| Так как устройство симметрично, то | |

*1*  *2*

 *Z*

*Z*

 *W*  *Zн*

* *W Zн*

 *1* 

 *1*

 *1*  *Yн*

 *1*  *1*  *Yн*    *jB .*

*1*  *Yн*

*1*  *1*  *Yн*  *2*  *jB*

Устройство не имеет потерь, поэтому его МР унитарна, величины

*Т12=Т21* можно найти, используя свойство унитарности

1 1 2

2  *jB*

*T*12

 *T*21

 *S*21

 *S*12 

 2 ,

*S*11 *e j*11

*S*12

*e* *j*12 

*S*21 *e j*21

*S*22

*e* *j*22

 0.

Отсюда, с учетом равенств коэффициентов отражения и передачи следует

** ** ** **  **

**  **  **

Так как

11 12 12 11

или 12 11 2 .

** ** 2 2

Получим

11   2  *arctg B* , то **12

 *arctg* .

*B*

*T*12 

Окончательно

*T*12

*e j*12 

2  *jarctg*  2

*e B*

2  *jB*

 2 .

2  *jB*

*S*   1  *jB* 2 .

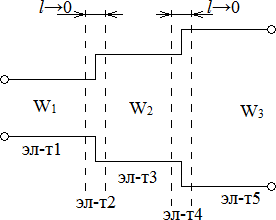
2  *jB*  2  *jB*

 

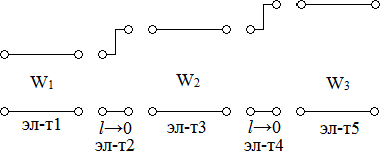
Любое сложное СВЧ устройство можно представить в виде соединения простых СВЧ устройств, для которых матрицы рассе- яния известны [6-9].

Процесс представления сложного устройства в виде соеди- нения простых – называется декомпозицией.

Пример: четвертьволновый трансформатор.



При декомпозиции все устройство делится условными се- кущими плоскостями на простые устройства.



При анализе сложных СВЧ устройств процесс декомпозиции порождает новую задачу. Если известны МР отдельных элемен- тов, то каким образом можно вычислить МР всего соединения. Решение задачи известно, но связано со сложными алгоритмами. Примеры алгоритмов имеются в книгах [6,8].

##### 2.2 Матрицы передачи СВЧ устройств

Наряду с МР для анализа СВЧ устройств применяются дру- гие виды матриц. Достаточно часто применяются матрицы пере- дачи, которые удобно применять для каскадного соединения че- тырехполюсников. Рассмотрим четырехполюсник, показанный на рис. 2.3.

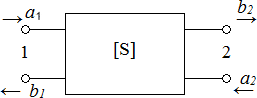


Рис. 2.3. Определение понятия матрицы передачи.

Запишем систему линейных уравнений, связывающих отра- женные и падающие волны на входах четырехполюсников в виде МР.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *b*1  *S*11*a*1  *S*12*a*2 ,  *b*2  *S*21*a*1  *S*22*a*2. | В матричном виде | *b*1   *S*11 *S*12 *a*1   *b*  *S S* *a*    2   21 22  2  |

Но системы уравнения можно записать и по другому, разре- шив их относительно величин с индексом 1.

|  |  |
| --- | --- |
| *a*1  *t*11*b*2  *t*12*a*2 ,  *a*2  *t*21*b*2  *t*22*a*2. | *a*1  *t*11 *t*12   *b*2   В матричном виде *b*  *t t*  *a*    1   21 22   2  |

Очевидно, элементы матриц [S] и [T] взаимосвязаны [9]. Из первого уравнения второй системы следует

*b*2 

1

*t*11

*a*  *t*12

1 *t*11

*a*2.

Сравнивая со вторым уравнением первой системы, получаем

*S*21 

1 ,

*t*11

*S*22

  *t*12 .

*t*11

Из второго уравнения второй системы

*b*1  *t*21*b*2  *t*22*a*2 ,

подставим сюда значение b2 из второго уравнения первой систе- мы

*b*1  *t*21*S*21*a*1  *t*11*S*22*a*2

подставим сюда найденные ранее S21 S22

 *t*22*a*2,

 *t*21  

*t*21*t*12 

*b*1  

### *t*

*a*1  *t*22  *t*

*a*2 ,

 11   11 

сравнивая это выражение с первым уравнением первой системы получаем

*S*11 

*t*21 ,

*t*11

*S*12

 *t*22

 *t*21*t*12 .

*t*11

Установим обратную связь, очевидно

*t*  1

11 *S*21

*t*   *S*22 .

12 *S*21

Найдем *a1* из второго уравнения первой системы

*a*1 

1 *b*

*S*21 2

 *S*22

*S*21

*a*2 ,

подставим это выражение в первое уравнение первой системы

 *S*11  

*S*11*S*22 

*b*1   *S* *b*1   *S*12  *S* *a*2 ,

 21   21 

сравнивая со вторым уравнением второй системы получаем

*t*21 

*S*11 ,

*S*21

*t*12

 *S*12

 *S*11*S*22 .

*S*21

Рассмотрим каскадное соединение двух

четырехполюсников, показанное на рис. 2.4.

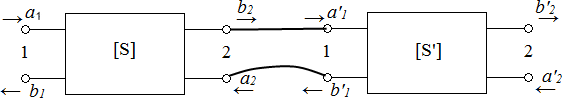
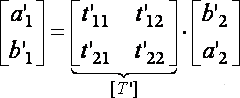


Рис. 2.4. Каскадное соединение четырехполюсников

Для четырехполюсников, показанных на рисунке, матрич- ные уравнения, при использовании матриц передачи, имеют вид

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | и | . |

Учтем, что при каскадном соединении четырехполюсников, получим новый общий четырехполюсник, который будет описы- ваться суммарной матрицей передачи.

*a*1  *T*  *b*'2 ,

*b*   *a*' 

где

 1 

 2 

*a1, b1* – входные волны;

*a'1, b'1* – выходные волны.

Причем, из рис. 2.4 следует, что при соединении четырехпо- люсников ряд волн сливаются *b2=a'1*; *a2=b'1*.

Поэтому это уравнение примет вид

*a*1  *T*  *b*2   *T*  *b*'1   *T*  *T* ' *b*'2 

*b* 

*a* 

*a*' 

*a*' 

 1 

 2 

 1

 2  ,

отсюда следует

*T*  *T*  *T* '

Общая матрица передачи каскадного соединения четырех- полюсников равна произведению матриц передачи всех четырех- полюсников, вычисляемому в порядке, соответствующему поряд- ку соединения четырехполюсников.

##### 2.3. Ориентированные графы

Наряду с волновыми матрицами для описания СВЧ устройств используются графы [6]. Рассмотрим основные поня- тия по аналогии с понятиями матриц рассеивания используя обо- значения рис. 2.1. Система линейных уравнений связывающая от- раженные и падающие волны на входах устройства имеет вид

*b*1



 *S*11*a*1  *S*12*a*2  *S*13*a*3,

*b*2

*b*3



 *S*21*a*1  *S*22*a*2

 *S*31*a*1  *S*32*a*2

 *S*23*a*3,

 *S*33*a*3.

Изобразим эту систему уравнений в виде рис. 2.5. Падаю- щие волны *ai* и отраженные волны *bi* изображаем в виде точек (полюсов графа).

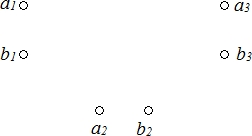


Рис. 2.5. Полюсы графа

Покажем связь между полюсами графа (рис. 2.6.), следую- щую из системы линейных уравнений в виде линии, соединяю- щих полюса, со стрелками, направленными в соответствии с при- чинно-следственной связью от падающих волн к отраженным. Форма линий роли не играет.

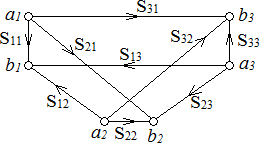


Рис. 2.6. Ориентированный граф, соответсвующий системе ли- нейных уравнений

Линии – ветви или ребра графа. Уровень связи между полю- сами запишем в виде величины рядом с ребром в соответствии с коэффициентом из системы линейных уравнений. Эта величина называется передачей графа или ребра графа.

Очевидно, что между рис. 2.6 и исходной системой линей- ных уравнений, с учетом введенных правил, существует взаимно- однозначная связь. По системе уравнений можно построить граф единственным образом и по рис. 2.6 можно записать систему уравнений единственным образом.

Рассмотрим остальные основные понятия, относящиеся к ориентированным графам, на примере применения графов к ана- лизу схемы устройства из задания на курсовое проектирование, показанной на рис. 2.7.

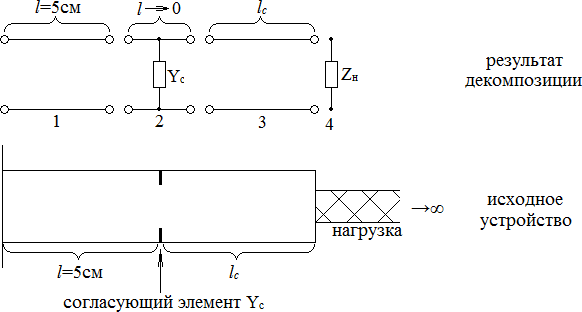


Рис. 2.7. Схема устройства из задания на курсовое проектирование

Все устройство состоит из четырех простых элементов. Изобразим их условно и пронумеруем все входы устройств по- следовательно, как показано на рис. 2.8.

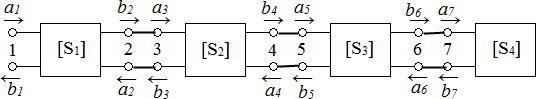


Рис. 2.8. Схема устройства после декомпозиции.

Запишем матрицы рассеяния всех устройств, используя вве- денную нумерацию входов

  *S*11

*S*21   0

*e* *jl* 

*S*1  *S*

*S*   

 *jl* 

 12

22 

*e*

 *Yc*

0  ,

# 2 

*S*33

*S*34 

 2  *Yc*

2  *Yc* 

*S*2  

*S S*   2



*Y*

 43 44 



#  2  *Y*



*c* 

2  *Y*  ,

 *c c* 

*S*55 *S*56   0

*e* *jlc* 

*S*3  

*S S*

  

 *jlc* 

 65 66  *e*

# 0 

*S*4   *S*77   *Ãí* 

Изобразим последовательно графы всех устройств, как пока- зано на рис. 2.9.

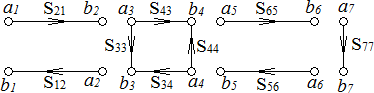


Рис. 2.9. Графы отдельных элементов устройства, выделенных при декомпозиции

При соединении всех устройств в исходную схему, ряд волн сливаются. На графе эти условия являются условиями эквива- лентности полюсов

b2=a3, b4=a5, b6=a7, a2=b3, a4=b5, a6=b7.

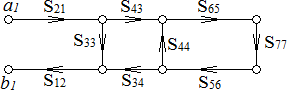
Соответствующие точки должны быть объединены. Полу- чим суммарный граф устройства, показанный на рис. 2.10

Рис. 2.10. Общий ориентированный граф устройства

Для решения графа используется два пути: инверсия (преоб- разование) графа (сложный путь) и правило Мэзона. Используем второй способ. Предварительно необходимо дать ряд определе- ний:

Путь в графе – это линия, проведенная по ребрам, в направле- нии стрелок, соединяющая два полюса, при условии, что ни одна точка не проходится дважды.

Передача пути – произведение передач ребер, входящих в путь.

Пример: на рис. 2.10 полюса *a1* и *b1* соединены двумя путя-

ми

S1пути=S21 S33 S12, S2пути=S21 S43 S65 S77 S56 S34 S12.

Контуром 1 порядка называется путь, позволяющий вернуться в

исходный полюс. Передача контура – произведение передач ре- бер, образующий контур.

Пример: на рис. 2.10 Sконт=S65 S77 S56 S44.

Контуром 2 порядка называется совокупность двух контуров 1 порядка, не имеющих общих точек. Передача контура – произве- дение передач контуров 1 порядка, образующих контур 2 порядка и т.д.

Контуром *i*-го порядка называется совокупность *i-* контуров 1 порядка.

Правило Мэзона можно записать в виде формулы

*S*  *N S ï óò è* 1  *Si* '*êî í ò* .*í* .*ê*.  *Si* "*êî í ò* .*í* .*ê*.,

*pq*  *i*

*i*1

*i i*

1  *S*

'*êî í ò* .   *S*

"*êî í ò* .

где Spq – полная передача из полюса *p* в полюс *q*,

Si пути – передача *i-*го пути, между полюсами *p, q.*

S' – контура нечетного порядка, S" – контура четного порядка,

Siнк – контур, не касающийся *i-*го пути.

Если исходным полюсом является *a1* , в оконечным полюсом яв- ляется *b1* , то

*b*1  *a*1*Sab* .

1 1

Для схемы, используемой в примере, имеем

*Г*  *b*1 *S S S*

* *S S S S*

*S S S* 1

*a*1 21

33 12

21 43 65 77

56 34

12 1 *S*65*S*77 *S*56*S*44

Учитывая взаимность составляющих простых устройств, получаем

*Г*  *S* 2 *S* 2

 *S* 2 *S* 2 *S* 2 *S* 1

33 12

56

12 34 56

77 1 *S* 2

*S*77

*S*44 .

#### ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Содержание пояснительной записки курсовой работы:

* титульный лист с указанием кафедры Телекоммуникационных систем, наименованием работы, указанием автора и руководи- теля, указанием учебного года в соответсвии с инструкцией по курсовому проектированию;
* лист задания на курсовую работу с указанием индивидуальных данных для расчета в соответсвии с инструкцией по курсовому проектированию;
* расчетные материалы с необходимыми пояснениями. Задание состоит из трех частей.

##### Расчет СВЧ линий передачи

Определить поперечные размеры и рассчитать основные пара- метры следующих типов линий передач, указанных в табл. 3.1 в соответсвии с вариантом задания:

Таблица 3.1 Исходные данные для курсового проектирования

|  |  |
| --- | --- |
| Исходные данные | Определяемые величины |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип волно- вода | Диапа- зон ча- стот в ГГц | Мате- риал стенок | Ди- элек- трик,  , | Волно- вое со- про- тивле- ние | Определить по- перечные раз- меры и затем рассчитать на центральной частоте | Постро стро- ить график в диа- пазоне задан- ных  частот |
| Пря-  моу- | 5-7 | Медь | - | - | Волновое со-  противление в | Vф/с |
| 6-9 |
| голь- |  |  |  | Ом |  |
| 7-10 |
| ный |  |  |  |  |  |
| 8-11 |
| труб- чатый |  |  |
| 11-14 | Латунь | Затухание в дБ/м | /k |
| 13-16 |
|  | 15-20 |  |  |  |  |  |
| 17-23 | Алю-  ми-ний | Предельную  мощность в |  |
| 20-25 |
|  |  |  |  | КВт |  |
| 25-35 |
|  | 35-37 |  |  |  |  |  |
| Полос-  ко-вый | 6-7 | Экран  и по- | Под-  ложка - | 50 Ом | Затухание в  дБ/м | /k |
| несим |  | лосок - | арлон |  |  |  |
| мет- | 6,5-7,5 | медь | **AD-** |  |  |  |
| рич-  ный |  |  | **250** |  |  |  |
|  | 7-8 |  | **AD-** |  |  |  |
|  |  |  | **270** |  |  |  |
|  | 7,5-8,5 |  | **AD-** |  |  |  |
|  |  |  | **295** |  |  |  |
|  | 8-9 |  | **AD- 300** | 75 Ом |  |  |
|  | 8,5-9,5 |  | **AD-** |  |  |  |
|  |  |  | **320** |  |  |  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 9-10 |  | **AD- 350** |  |  |  |
| 9,5-  10,5 | **AR- 600** |
| Коак- си- альный кабель | 1-2 | Медь | Ди- элек-  трик | 50 Ом | Затухание в дБ/м |  |
| 2-3 | поли-  этилен |
| 3-4 |
| 4-5 | фторо- пласт | Предельную мощность в  КВт |
| 5-6 | 75 О  м |

##### Согласование нагрузки СВЧ линии передачи

* + 1. **Определение параметров нагрузки**

Нагрузкой линии передачи в виде прямоугольного трубчатого волновода с размерами внутреннего сечения **a** x **b**, рассчитанного в разделе 3.1, является длинный волновод прямоугольного сече- ния, заполненный диэлектриком с параметрами, приведенными в таблице. Определить комплексный коэффициент отражения, ком- плексное входное сопротивление, нормированное к волновому сопротивлению линии передачи, и КСВ на входе нагрузки на цен- тральной частоте рабочего диапазона в соответсвии с данными из табл.3.2.

Таблица 3.2

Данные для волновода – нагрузки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметры волновода - нагрузки | | | |
| № | Сечение |  диэлектрика | tg() диэлектрика |
| 1 | 0,9 **a** x 0,8 **b** | 2 | 0,3 |
| 2 | 0,8 **a** x 0,7 **b** | 2,5 | 0,2 |
| 3 | 1,1 **a** x 0,7 **b** | 3 | 0,1 |

##### 3.2.2 Расчет согласования нагрузки реактивным штырем или диафрагмой

Рассчитать, пользуясь диаграммой Смита – Вольперта, место включения и нормированный адмитанс согласующего элемента,

обеспечивающего согласование нагрузки на центральной частоте диапазона. Построить на диаграмме Смита – Вольперта траекто- рию перемещения точки, характеризующей режим, от входа нагрузки до места включения согласующего элемента. Рассчитать размеры согласующего элемента. Типы согласующих элементов приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 Данные для типов согласующих элементов

|  |  |
| --- | --- |
| 1 | Индуктивный штырь |
| 2 | Индуктивная несимметричная диа-  фрагма |
| 3 | Индуктивная симметричная диафрагма |
| 4 | Емкостная симметричная диафрагма |
| 5 | Емкостная несимметричная диафрагма |

##### 3.2.3. Расчет согласования нагрузки параллельным или последовательным шлейфом

Рассчитать аналитически место включения и длину короткоза- мкнутого шлейфа, обеспечивающего согласование нагрузки на центральной частоте заданного диапазона.

##### Расчет частотной характеристики СВЧ тракта

Волноводный тракт содержит удлинительный волновод, длиной 50 мм, волновод с нагрузкой, согласованной элементом, рассчи- танным в п. 2.2.

* выполнить декомпозицию СВЧ тракта, представив его в виде каскадного соединения четырехполюсников и двухполюсника;
* для каждого каскада, выделенного при декомпозиции, соста- вить матрицу рассеяния, позволяющую рассчитать элементы на любой частоте заданного диапазона;
* Матричным методом или методом ориентированных графов рассчитать и построить график зависимости коэффициента стоячей волны на входе СВЧ тракта от частоты в заданном

диапазоне частот. Объяснить ход расчета и полученные резуль- таты.

##### Алгоритм выбора численных значений

**для задания на курсовое проектирование**

Выбор численных значений осуществляется из табл. 3.1 – 3.3. Выбор производится по номеру N записи фамилии студента в учебном журнале группы.

Выбор значений из табл. 3.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Исходные данные | | | | | | Определяемые величины | |
| Тип волно- вода | | Диапа- зон ча- стот в ГГц | Мате- риал сте- нок | Ди- элек- трик,  , | Волно- вое со- про- тивле- ние | Определить поперечные размеры и за- тем рассчитать  на центральной частоте | Построить график в диапазоне заданных частот |
| N | | строка | стро-  ка | строка | строка | строка | строка |
| Прямоу-гольный трубчатый | 1 | 1 | 1 | - | - | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | - | - | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | - | - | 3 | 3 |
| 4 | 4 | 2 | - | - | 1 | 1 |
| 5 | 5 | 1 | - | - | 2 | 2 |
| 6 | 6 | 3 | - | - | 1 | 3 |
| 7 | 7 | 1 | - | - | 3 | 1 |
| 8 | 8 | 2 | - | - | 2 | 1 |
| 9 | 9 | 3 | - | - | 3 | 2 |
| 10 | 10 | 1 | - | - | 3 | 1 |
| 11 | 11 | 2 | - | - | 1 | 2 |
| 12 | 1 | 1 | - | - | 3 | 3 |
| 13 | 2 | 3 | - | - | 1 | 1 |
| 14 | 3 | 2 | - | - | 1 | 2 |
| 15 | 4 | 3 | - | - | 1 | 3 |
| 16 | 5 | 1 | - | - | 3 | 3 |
| 17 | 6 | 1 | - | - | 2 | 3 |
| 18 | 7 | 3 | - | - | 1 | 1 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 19 |  |  |  |  |  |  |
| N | | строка | стро-  ка | строка | строка | строка | строка |
| Полосковый несимметричный волновод | 1 | 1 | - | 1 | 1 | - | 2 |
| 2 | 2 | - | 2 | 2 | - | 1 |
| 3 | 3 | - | 3 | 1 | - | 2 |
| 4 | 4 | - | 4 | 2 | - | 1 |
| 5 | 5 | - | 5 | 1 | - | 2 |
| 6 | 6 | - | 6 | 2 | - | 1 |
| 7 | 7 | - | 7 | 1 | - | 2 |
| 8 | 8 | - | 1 | 2 | - | 1 |
| 9 | 1 | - | 2 | 1 | - | 2 |
| 10 | 2 | - | 3 | 2 | - | 1 |
| 11 | 3 | - | 4 | 1 | - | 2 |
| 12 | 4 | - | 5 | 2 | - | 1 |
| 13 | 5 | - | 6 | 1 | - | 2 |
| 14 | 6 | - | 7 | 2 | - | 1 |
| 15 | 7 | - | 1 | 1 | - | 2 |
| 16 | 8 | - | 2 | 2 | - | 1 |
| 17 | 1 | - | 3 | 1 | - | 2 |
| 18 | 2 | - | 4 | 2 | - | 1 |
| 19 |  | - |  | 1 | - | 2 |
| N | | строка | стро-  ка | строка | строка | строка | строка |
| Коаксиальный кбель | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 2 | 2 | - | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 3 | - | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 4 | 4 | - | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 5 | - | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 6 | 1 | - | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 7 | 2 | - | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 3 | - | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 9 | 4 | - | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 10 | 5 | - | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | - | 2 | 1 | 2 | 1 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 12 | 2 | - | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 13 | 3 | - | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 14 | 4 | - | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 15 | 5 | - | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 16 | 1 | - | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 17 | 2 | - | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 18 | 3 | - | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 19 |  |  |  |  |  |  |

#### ИНСТРУКЦИЯ МГТУ МИРЭА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

##### Общие требования к порядку выполнения и содержанию работы

* + 1. Руководитель Работы:
* устанавливает требования к содержанию и объему Работ на основе методических указаний по курсовому проектированию, разработанных на кафедре, и настоящей Инструкции и доводит их до сведения студентов при выдаче заданий на курсовое проек- тирование;
* определяет основные направления деятельности студентов по выполнению Работ в соответствии с заданиями.
  + 1. Общий объем Работы, как правило, не должен быть менее 15 и не более 50 листов.
    2. Содержание Работы должно строго соответствовать за- данию на ее выполнение.
    3. Подбор литературы по теме курсового проекта (рабо- ты) осуществляется студентом самостоятельно. В обязанности руководителя входит определение наиболее важных источников, которые обязательно должны быть использованы при выполнении Работы. Студенту должно быть рекомендовано использовать все источники информации: научно-технические библиотеки, элек- тронно-библиотечные системы и Интернет. Количество использу- емых источников при выполнении Работы определяется студен- том самостоятельно (рекомендуемое количество от 5 до 20). Сту-

дент обязательно должен использовать источники, изданные в по- следние 3 года.

* + 1. В обязанности руководителя входит консультирование студента по вопросам выполнения Работы в соответствии с рас- писанием, утверждаемым заведующим кафедрой, которое выве- шивается на информационном стенде кафедры или/и представля- ется на сайте кафедры не позднее срока утверждения тем Работ. Руководитель может проводить индивидуальные консультации по составленному совместно со студентом графику.
    2. Работа должен соответствовать следующим требова- ниям:
* быть выполненной на достаточном теоретическом уровне;
* основываться на результатах самостоятельной работы (ис- следования);
* иметь обязательные самостоятельные выводы в заключе- нии Работы;
* иметь необходимый объем;
* быть оформленной по стандарту и выполненным в ука- занные в задании сроки.
  + 1. Работа, как правило, должна содержать следующие разделы (части):
* титульный лист;
* задание на выполнение Работы;
* реферат;
* содержание;
* перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц, терминов;
* введение;
* основная часть;
* заключение (или выводы);
* список использованных источников;
* приложения.

В зависимости от конкретного содержания и особенностей Работ по определенным учебным дисциплинам по согласованию с руководителем в их структуру могут не включаться приложения

или некоторые другие части, исключение которых не снижает це- лостности Работы и обоснованности проектных решений, пред- ложений, рекомендаций и выводов.

Титульный лист Работы оформляется по установленному образцу, приведенному в приложении.

Типовая форма задания на курсовое проектирование (вы- полнение курсовой работы) приведена в приложении. При боль- шом объеме пунктов 2 и 3 задания, их продолжение переносится на оборотную сторону листа задания.

Для контроля хода выполнения Работы рекомендуется про- ведение мониторинга процесса. Соответствующее решение при- нимается кафедрой. В этом случае на обороте листа задания (или на отдельном листе, который располагается после листа задания) располагается таблица «Мониторинг процесса выполнения кур- сового проекта (работы)», которая заполняется руководителем и исполнителем проекта (работы) в процессе поэтапного выполне- ния проекта (работы) (см. приложение).

Реферат курсового проекта (рекомендуемый объем 1-2 стр.) представляет собой краткое изложение содержания Работы с ос- новными выводами и рекомендациями (ГОСТ 7.32-2001). В рефе- рате также приводятся данные об объеме проекта, количестве ри- сунков, таблиц, приложений, использованных источников.

В содержании приводятся наименования структурных ча- стей Работы, разделов и подразделов его основной части с указа- нием номера страницы, с которой начинается соответствующая часть, раздела, подраздел.

В перечне сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов приводятся используемые в Работе малорас- пространенные сокращения, условные обозначения, символы, единицы измерения и специфические термины. Если в перечне отсутствуют специфические термины или единицы измерения или условные обозначения, то данная часть Работы отсутствует.

Во введении (рекомендуемый объем 1-2 стр.) дается общая характеристика Работы: обосновывается актуальность выбранной темы; определяется цель работы и задачи, подлежащие решению для еѐ достижения; описываются объект и предмет исследования,

используемые методы и информационная база исследования, а также кратко характеризуется структура Работы по разделам.

Основная часть (рекомендуемый объем от 10 до 40 стр.) со- держит материал, необходимый для достижения цели Работы и решения поставленных задач в процессе проектирования. Содер- жание основной части должно соответствовать теме, указанной в задании и полностью ее раскрывать.

Обязательным для текста Работы является логическая связь между разделами и последовательное развитие основной темы на протяжении всей работы, самостоятельное изложение материала, критический подход к изучаемым данным, проведение необходи- мого анализа, аргументированность выводов, обоснованность предложений и рекомендаций. Также обязательным является наличие в основной части Работы ссылок на использованные ис- точники.

В заключении (рекомендуемый объем 1-2 стр.) логически последовательно излагаются теоретические выводы и/или прак- тические предложения, которые сформулировал студент в резуль- тате выполнения Работы.

Список использованных источников отражает степень охва- та материала при рассмотрении поставленной задачи.

В приложения помещается вспомогательный материал (при его наличии), который при включении в основную часть работы загромождает текст (таблицы вспомогательных цифровых дан- ных, инструкции, методики, формы отчетности и других доку- ментов и т.п.).

* + 1. Студент и руководитель несут ответственность за со- держательную часть Работы. Студент несет полную ответствен- ность за самостоятельность выполнения и достоверность резуль- татов Работы.

##### Оформление работы

* + 1. Работа представляется руководителю в сброшюрован- ном виде (в папке со скоросшивателем) (Работа, оформленная в соответствии с требованиями – пояснительная записка).
    2. Работа оформляется в соответствии с требованиями ГОСТов (ГОСТ Р 30 – 2003 и др.). В методических указаниях по курсовому проектированию, разрабатываемых кафедрами, как правило, приводятся конкретные рекомендации по оформлению текстов, таблиц, рисунков и т.д. и указываются соответствующие ГОСТы.

Работа, как правило, представляется в отпечатанном виде. Допускается рукописный вариант, при этом, как правило, объем работы увеличивается.

##### Защита работы

* + 1. Аттестация студентов по результатам выполнения Ра- бот должна быть проведена до начала экзаменационной сессии.
    2. Законченная Работа, подписанная студентом, представ- ляется руководителю. Срок сдачи определяется заданием на Ра- боту, но, как правило, не позднее предпоследней недели учебных занятий в семестре.
    3. Работа, удовлетворяющая предъявляемым требованиям (с положительным отзывом руководителя), допускается к защите, о чем руководитель делает надпись на титульном листе работы.
    4. Письменный отзыв руководителя должен включать:
* заключение о соответствии Работы теме и заданию;
* оценку качества выполнения Работы;
* оценку полноты разработки поставленных вопросов, тео- ретической и практической значимости Работы;
* характеристику работы студента;
* рекомендуемую оценку Работы.

Студент – автор Работы, имеет право ознакомиться с пись- менным отзывом до защиты.

* + 1. При наличии в Работе недостатков руководитель имеет право допустить ее к защите (указав на них в отзыве) или пред- ложить студенту устранить их. Студент обязан доработать или переработать Работу в срок, установленный руководителем с уче- том сущности замечаний и объема необходимой доработки.
    2. Руководитель Работы, которая, по его мнению, содер- жит существенные недостатки и не может быть доработана, не

допускает Работу к защите и проставляет в экзаменационной ве- домости студенту неудовлетворительную оценку.

* + 1. Курсовые проекты до защиты рецензируются. Рецен- зирование осуществляется преподавателями или приглашенными специалистами. Работа в законченном виде представляется ре- цензенту не позднее чем за 3-5 дней до защиты. Студент – автор Работы, имеет право ознакомиться с рецензией до защиты.
    2. Работа оценивается комиссией. В состав комиссии вхо- дит руководитель Работы и преподаватели кафедры, по тематике которой выполняется курсовой проект. Состав комиссии (не ме- нее двух человек) формируется заведующим кафедрой и доводит- ся до сведения преподавателей кафедры и студентов распоряже- нием по кафедре.
    3. Защита Работы, как правило, состоит в коротком до- кладе студента (5–7 минут) и в ответах на вопросы по существу Работы. Вопросы могут относиться к Работе, к объекту, на базе которого выполнена Работа, к теории изучаемой дисциплины и т.п.
    4. Вопросы к студенту, заданные во время защиты, крат- кая характеристика ответов студента и замечания комиссии по существу работы и/или по ответам студента могут быть записаны непосредственно на самой пояснительной записке. В противном случае, комиссией составляется протокол (приложение 3), в кото- рый вносятся вопросы, заданные студенту и дается краткая ха- рактеристика его ответов. Протокол хранится вместе с Работой.
    5. Формой аттестации студента по Работам является дифференцированный зачет (зачет с оценкой). Оценка за Работу объявляется непосредственно после защиты и выставляется в ве- домости и зачетной книжке.
    6. При защите Работы студент должен показать полу- ченные в процессе выполнения Работы знания и уметь ответить на вопросы по теме Работы, а также на замечания руководителя. При оценке Работы учитывается как качество устного ответа сту- дента, так и глубина проработки темы, умение обосновать соб- ственное мнение по изученным проблемам, качество анализа фактического материала, полученные выводы и рекомендации.
    7. Работа оценивается по четырехбальной системе (от- лично, хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно).

Оценка «отлично» выставляется, если выполнены все сле- дующие условия:

* Работа выполнена в полном соответствии с заданием, от- личается глубиной проработки всех разделов содержательной ча- сти, пояснительная записка оформлена с соблюдением установ- ленных правил;
* руководитель характеризует деятельность студента поло- жительно (в частности, отмечает его инициативу, самостоятель- ность, систематичность работы на всех этапах ее выполнения);
* в докладе исчерпывающе, последовательно, четко и логи- чески правильно изложена суть Работы и ее основные результа- ты;
* студент свободно владеет теоретическим материалом, без- ошибочно применяет его при решении задач, сформулированных в задании;
* на все вопросы членов комиссии студент дает обстоятель- ные и правильные ответы, убедительно защищает свою точку зрения.

Оценка «хорошо» выставляется, если выполнены все следу- ющие условия:

* Работа выполнена в соответствии с заданием, отличается глубиной проработки всех разделов содержательной части, пояс- нительная записка оформлена с соблюдением установленных правил;
* руководитель характеризует деятельность студента поло- жительно, возможно, с незначительными замечаниями;
* в докладе правильно изложена суть Работы и ее основные результаты;
* студент достаточно твердо усвоил теоретический материал и может применять его самостоятельно и по указанию преподава- теля;
* на большинство вопросов членов комиссии студентом да- ны правильные ответы, студент защищает свою точку зрения до- статочно обоснованно.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если выполнено одно из следующих условий:

* Работа выполнена в основном правильно, но без необхо- димой проработки некоторых разделов;
* в докладе упущены некоторые принципиальные моменты содержательной части Работы;
* на вопросы членов комиссии студент отвечает неуверенно или допускает серьезные ошибки, неуверенно защищает свою точку зрения.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если студент не может защитить свои решения, допускает грубые фактические ошибки при ответах на поставленные вопросы или вовсе не отве- чает на них.

* + 1. Студентам, получившим неудовлетворительную оцен- ку за Работу, предоставляется право выбора новой темы Работы или, по решению руководителя, переработки прежней темы и определяется новый срок для ее выполнения.
    2. Студент, не представивший в установленный срок за- конченную Работу или не защитивший ее, считается имеющим академическую задолженность.
    3. Итоги выполнения Работ анализируются на заседани- ях соответствующих кафедр, а по мере необходимости – на засе- даниях ученого совета факультета.

#### 5 ПРИЛОЖЕНИЯ

***Форма титульного листа курсового проекта (работы)***

|  |
| --- |
| для прик эмбл |
| МИНОБРНАУКИ РОССИИ |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  **"Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики"**  **МГТУ МИРЭА** |
| *(наименование факультета)* |
| *(наименование кафедры)* |

|  |  |
| --- | --- |
| **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТА)** | |
| **по дисциплине** | |
| **«** **»**  *(наименование дисциплины)* | |
| **Тема курсового проекта (работы) «** **»**  *(наименование темы)* | |
| Студент группы  *(учебная группа)* | *Фамилия И.О* |
| Руководитель курсового проекта (рабо- ты)  *должность, звание, ученая степень* | *Фамилия И.О* |
| Рецензент (*при наличии*)  *должность, звание, ученая степень* | *Фамилия И.О* |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Работа представлена к защите | « » 201 г. | *(подпись студента)* |
| «Допущен к защите» | « » 201 г. | *(подпись руководите- ля)* |

Москва 201\_ г.

***Форма задания на курсовой проект (работу)***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| для прик эмбл | | | |
| МИНОБРНАУКИ РОССИИ | | | |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  **"Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики"**  **МГТУ МИРЭА** | | | |
| *(наименование факультета)* | | | |
| *(наименование кафедры)* | | | |
| **Утверждаю** | | | |
| Заведующий кафедрой  *И.О. Фамилия* | | | |
| «\_ » 201 г. | | | |
| **ЗАДАНИЕ** | | | |
| **на выполнение курсового проекта (работы)** | | | |
| **по дисциплине** « » | | | |
| Студент Группа | | | |
| **Тема** | | | |
| **Исходные данные:** |  |  |  |
| **3. Перечень вопросов, подлежащих разработке, и обязательного графического материала:** | | | |
| **Срок представления к защите курсового проекта (работы):до** « \_» 201\_ г. | | | |
| Задание на курсовой проект, (работу) выдал | «\_ »\_ 201 г. | *Подпись руководителя проекта* | *Ф.И.О. руково- дителя*  *проекта* |
| Задание на курсовой проект, (работу) получил | «\_ »\_ 201 г. | *Подпись студента – исполнителя проекта* | *Ф.И.О. студен- та - исполнителя*  *проекта* |

***Рекомендуемая форма оборота листа задания на курсовой проект (работу)***

**Мониторинг процесса выполнения курсового проекта (работы)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № этапа | Этап курсового проекта, работы выполнил и пред- ставил результа- ты руководителю проекта (работы),  *дата и подпись исполнителя* | Работу по этапу курсового проек- та (работы) при- нял на рассмот- рение,  *дата и подпись руководителя* | Рекомендации и замечания по этапу курсового проекта (работы) выдал исполнителю,  *дата и подпись руководителя* | Оценка выпол- нения этапа курсового про- екта, (работы) (в соответ- ствии с балль- но-рейтинговой системой) | Комментарии руководителя курсового про- екта (работы) |
| 1 |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |

|  |
| --- |
| ***Типовая форма протокола заседания комиссии по защите***  ***курсового проекта (работы)*** |
| для прик эмбл |
| МИНОБРНАУКИ РОССИИ |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  **"Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики"**  **МГТУ МИРЭА** |
| *(наименование факультета)* |
| *(наименование кафедры)* |

**Протокол заседания комиссии по защите курсового проекта**

от 201 г. №

Состав комиссии:

*(должность, ученая степень, ученое звание)*

Утверждена распоряжением заведующего кафедрой

*(наименование кафедры)*

от « » 201\_ г. № .

Слушали защиту курсового проекта (работы)

*(тема)*

по дисциплине

студента груп-

пы

*(группа) (Ф.И.О.)*

Во время защиты курсового проекта (работы) были заданы следую- щие вопросы:

1

2.

3. Итоговая (комплексная) оценка выполнения и защиты курсового проекта

(работы)

Члены комиссии

*(подпись)*

*(Ф.И.О.)*

##### Материалы для подложек полосковых волноводов AD-250, AD-270, AD-300, AD-320 и AD-350

Материалы AD Series представляют собой группу композитных материалов на основе стеклоткани с тефлоновым наполнением, используемых в качестве оснований печатных плат. Сочетание превосходных электрических свойств политетрафторэтилена с достоинствами стеклоткани типа 7628 и/или 2116 обеспечивает невысокую стоимость фольгированных диэлектриков, пригодных для массового производства коммерческих изделий в сфере бес- проводной коммуникации.

В настоящий момент производятся поставки материалов AD Se- ries с толщиной диэлектрика от 0,38 мм до 1,57 мм и диэлектри- ческой постоянной от 2,5 до 3,6 в определенных сочетаниях.

Довольно высокая диэлектрическая постоянная фольгирован- ных диэлектриков AD Series позволяет предельно снизить разме- ры проводников типичных СВЧ плат. Благодаря низким потерям материалы AD Series идеальны при создании устройств обработ- ки цифровых сигналов.

Методы обработки материалов AD Series отвечают стандарт- ным рекомендациям по производству печатных плат с использо- ванием базовых материалов на основе политетрафторэтилена. Благодаря более высокому содержанию стекловолокна тепловое расширение снижено по всем осям, что повышает надежность металлизированных сквозных отверстий.

Возможны поставки материалов AD Series с электроосажденной медной фольгой (17,5 мкм, 35 мкм и 70 мкм) на обеих сторонах либо с металлической подложкой. Путем использования алюми- ния, латуни или меди в качестве материала подложки обеспечива- ется необходимый теплоотвод и механическая опора для фольги- рованного диэлектрика.

**Типичные свойства: стеклотекстолиты AD Серии**

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики | Типичные значения |
| Диэлектрическая постоянная  | AD-250 2,50 +/- 0,05  AD-270 2,70 +/- 0,05 |

|  |  |
| --- | --- |
|  | AD-295 2,95 +/- 0,05  AD-300 3,00 +/- 0,05  AD-320 3,20 +/- 0,10  AD-350 3,60 +/- 0,10 |
| Коэффициент рассеяния tg | 0,003 |
| Тепловой коэффициент диэлектри-  ческой постоянной (ppm/ºC) | -110 |
| Объемное сопротивление (МОм-см) | 1,2 х 109 |
| Поверхностное сопротивление  (МОм) | 4,5 х 107 |
| Электрическая прочность (кВ) | >45 |
| Плотность (г/см3) | 2,4 |
| Теплопроводность (Вт/мК) | 0,235 |

##### Материалы для подложек полосковых волноводов AR1000 и AR600

**Текстолиты с высоким ε с наполнением из фторопласта/тканого фи- бергласа/керамики.**

AR1000 и AR600 компании Arlon представляют собой основан- ные на фторопласте тканые фибергласовые, усиленные керамикой композитные материалы, применяемые в качестве оснований для печатных плат.

Более высокие диэлектрические постоянные AR1000 и AR600 обеспечивают разнообразные степени миниатюризации цепей, в особенности для power amplifiers, фильтров, couplers и других компонентов, в которых применяются цепи с низким сопротивле- нием.

AR1000 и AR600 являются «мягкой основой» и сравнительно нечувствительны к вибрационным нагрузкам. Это позволяет до-

биваться высокой миниатюризации цепей без сложной обработки или операций с хрупкими материалами из чистой керамики.

AR1000 и AR600 совместимы с технологиями, применяемыми для оснований стандартных печатных плат на основе фторопла- ста. Кроме того, низкое вертикальное (Z-axis) тепловое расшире- ние, которого позволяет добиться керамическое наполнение, обеспечивает более высокую надежность металлизации отвер- стий в сравнении с обычными текстолитами на основе фторопла- ста.

##### Технические характеристики: текстолиты AR1000 и AR600 с наполнением из фторопласта/тканого фибергласа/керамики

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристики | Типичные зна-  чения AR1000 | Типичные зна-  чения AR600 |
| ДП при 10ГГц  | 10,0 \* | 6,0 \* |
| Коэффициент (factor) рассеяния  при 10ГГц tg | 0,003 | 0,0035 |
| Объемное сопротивление (МОм-  см) | 1,4 х 109 | 1,5 х 1012 |
| Поверхностное сопротивление  (МОм) | 1,8 х 109 | 3,8 х 109 |
| Плотность (г/см3) | 2,84 | 2,45 |

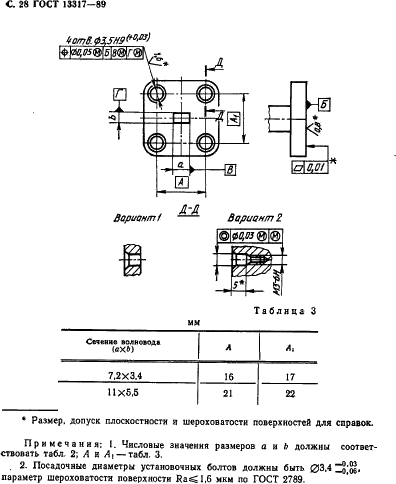
**Размеры прямоугольных волноводов**

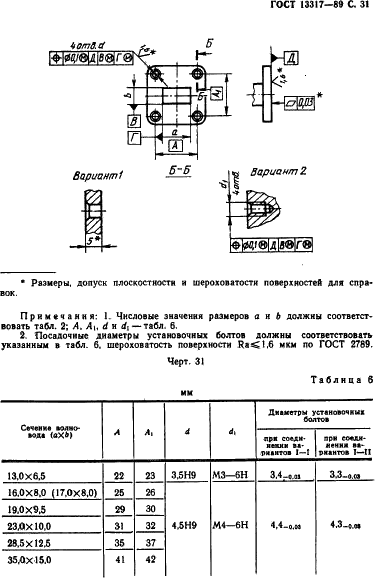
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Рекомендуемый диапазон ча- стот,**  **ГГц** | **Затухание\* на средней частоте для**  **медного вол- новода,**  **дБ/м** | **Обозначение** | | **Внутренние размеры,**  **мм** | | | **Размеры волноводов по**  **ГОСТ20900- 75** | | |
| **IEC** | **EIA** | **а** | **б** | **s** | **а** | **б** | **s** |
| 1,13-1,72 | 0,00522 | 14 | 650 | 165,1 | 82,55 | 2 | 160 | 80 | 2,5 |
| 1,45-2,2 | 0,00749 | 18 | 510 | 129,54 | 64,77 | 130 | 65 | 2,5 |
| 1,72-2,61 | 0,0097 | 22 | 430 | 109,22 | 54,61 | 110 | 55 | 2,5 |
| 2,17-3,31 | 0,0138 | 26 | 340 | 86,36 | 43,18 | 90 | 45 | 2 |
| 2,6-3,95 | 0,0189 | 32 | 284 | 72,14 | 34,04 | 72 | 34 | 2 |
| 3,22-4,9 | 0,0249 | 40 | 229 | 58,17 | 29,08 | 1,63 | 58 | 25 | 2 |
| 3,94-5,99 | 0,0355 | 48 | 187 | 47,55 | 22,15 | 48 | 24 | 2 |
| 4,64-7,06 | 0,0431 | 58 | 159 | 40,39 | 20,19 | 40 | 20 | 1,5 |
| 5,38-8,18 | 0,0576 | 70 | 137 | 34,85 | 15,8 | 35 | 15 | 1,5 |
| 6,57-10,0 | 0,0794 | 84 | 112 | 28,5 | 12,62 | 28,5 | 12,6 | 1 |
| 7,22-10,98 | 0,084 | - | 102 | 25,96 | 12,95 | - | - | - |
| 8,2-12,47 | 0,110 | 100 | 90 | 22,86 | 10,16 | 1,27 | 23 | 10 | 1 |
| 9,83-14,95 | 0,133 | 120 | 75 | 19,05 | 9,53 | 19 | 9,5 | 1 |
| 11,83-17,99 | 0,176 | 140 | 62 | 15,8 | 7,9 | 1,02 | 16 | 8 | 1 |
| 14,49-22,05 | 0,238 | 180 | 51 | 12,95 | 6,48 | 13 | 6,5 | 0,8 |
| 17,56-26,73 | 0,370 | 220 | 42 | 10,67 | 4,32 | 11 | 5,5 | 1 |
| 21,66-32,94 | 0,435 | 260 | 34 | 8,64 | 4,32 | - | - |  |
| 26,32-40,0 | 0,583 | 320 | 28 | 7,11 | 3,56 | 7,2 | 3,4 | 1 |
| 32,9-50,0 | 0,815 | 400 | 22 | 5,69 | 2,85 | 5,2 | 2,6 | - |
| 39,23-59,68 | 1,06 | 500 | 19 | 4,78 | 2,39 | - |
| 49,8-75,77 | 1,52 | 620 | 15 | 3,76 | 1,88 | 3,6 | 1,8 | - |

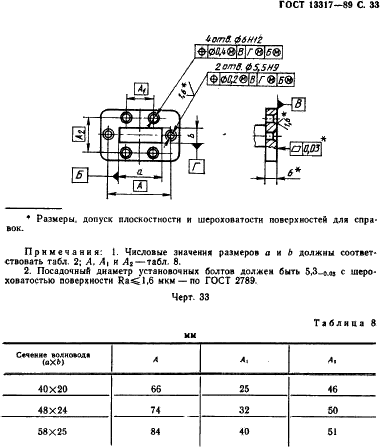
а - ширина канала волновода б - высота канала волновода s - толщина стенки

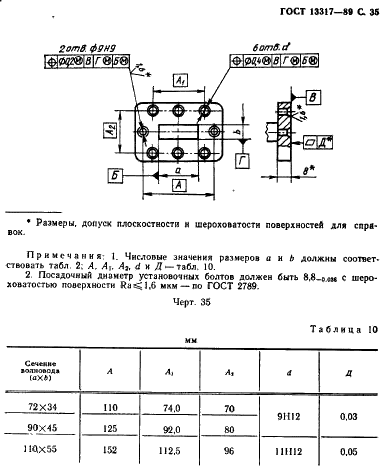
* Для алюминиевого волновода коэффициент 1,3
* для латунного волновода (Л63) коэффициент - 2,0

##### Размеры волноводных фланцев









**Соединители радиочастотные коаксиальные (коаксиальные разъемы)**

Одной из основных характеристик соединителей является его присоединительный размер, который в РФ описывается ГОСТ 20265-83 и ГОСТ 13317-80, где каждому размеру присвоен номер от I до IX. В пределах одного присоединительного размера осу- ществляется стыковка соединителей разных исполнений.

Присоединительные размеры соединителей зарубежного произ- водства описываются в стандарте МЭК 61169-1 и МЭК 169-1…20 и имеют более широкую номенклатуру - N, SMA, SMB, MCX, FME, BNC, TNC, SMP и др.

Распространѐнные виды разъѐмов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Обозначение русское** | **Обозначение международ- ное** | **Волновое сопр.,Ом** | **Сечение канала, мм/мм** | **Сочленение** | **Предельная част., ГГц** | **Изображение** |
| Тип-II | 7/16 | 50 | 16/6,95 | М27×1,5 | 7,5 |  |
| Тип III «Экс- пертиза» | Тип N | 50 | 7/3,04 | М16×1 (для III), дюймо- вая (для N) | 12,4/7,5 | Разъём N типа |
| Тип IV | нет аналога | 50 | 13,5/4,1 | М18×1 | 10/3 |  |
| Тип V | [Тип BNC 50 Ω](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%8A%D1%91%D0%BC#BNC-.D0.BA.D0.BE.D0.BD.D0.BD.D0.B5.D0.BA.D1.82.D0.BE.D1.80) | 50 | 7/2,15 | байонет | 10 | Разъём SMA типа |
| нет аналога | [Тип BNC 75 Ω](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%8A%D1%91%D0%BC#BNC-.D0.BA.D0.BE.D0.BD.D0.BD.D0.B5.D0.BA.D1.82.D0.BE.D1.80) | 75 |  | байонет |  |  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип VI | нет аналога | 50 | 10/3,4 | М20×1 | 10 |  |
| Тип VII | нет аналога | 75 | 16/4,6 | М27×1,5 | 1 |  |
| Тип VIII | нет аналога | 75 | 13,5/2,5 | М18×1 | 3 |  |
| Тип IX «Град» | [Тип SMA](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%8A%D1%91%D0%BC#SMA-.D0.BA.D0.BE.D0.BD.D0.BD.D0.B5.D0.BA.D1.82.D0.BE.D1.80) | 50 | 3,5/1,52 | М6×0,75(для  «Град»), дюймовая (для SMA) | 18 | Разъём SMA типа |
| нет аналога | [Тип SMB](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%8A%D1%91%D0%BC#SMB-.D0.BA.D0.BE.D0.BD.D0.BD.D0.B5.D0.BA.D1.82.D0.BE.D1.80) | 50 |  | дюймовая резьба | 4 |  |
| нет аналога | [Тип TNC](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%8A%D1%91%D0%BC#TNC-.D0.BA.D0.BE.D0.BD.D0.BD.D0.B5.D0.BA.D1.82.D0.BE.D1.80) | 50 | 7/2,15 | дюймовая резьба | 11 |  |
| Тип ВР-19 | Тип UHF | 50 |  | резьба 18 мм |  | Разъём типа ВР-19  Разъём UHF типа |

##### Коаксиальные кабели

**Общие сведения**

Радиочастотные кабели выпускаются слелуюших типов:

**РК** – радиочастотные коаксиальные кабели;

**РД** – радиочастотные симметричные кабели, двухжильные или из двух коаксиальных пар;

**РС** – радиочастотные кабели со спиральными проводниками ко- аксиальные н симметричные.

Кабели по конструктивному выполнению изоляции разделяются на три группы:

1. кабели со сплошной изоляцией, у которых все пространство между внутренним н внешним проводниками (коаксиальные ка- бели) заполнено сплошной изоляцией или обмоткой из изоляци- онных лент;
2. кабели с воздушной изоляцией, у которых на внутреннем про- воднике (коаксиальные кабели) через определенный интервал имеются выполненные из изоляционного материала шайбы, кол- пачки или кордель, наложенный по винтовой спирали, образую- щие изоляционный каркас между внутренним и внешним про- водниками;
3. кабели с полувоздушной изоляцией, у которых трубка из изо- ляционного материала, выполненная сплошной или в виде об- мотки из лент, расположена поверх или под изоляционным кар- касом, помещенным между внутренним и внешним проводника- ми (коаксиальные кабели).

К полувоздушной изоляции относится также пористо- пластмассовая, балонная и изоляция в виде шлицованной трубки.

По номинальному волновому сопротивлению устанавливаются следующие ряды кабелей:

- **типа РК** - 50, 75, 100, 150 и 200 Ом;

- **типа РС** – 50, 75, 100, 150, 200, 400. 800. 1600 и 3200 Ом;

- **типа РД** – 75, 100, 150, 200 и 300 Ом.

Допускается в технически обоснованных случаях волновое со- противление менее 50 Ом. Значения выбираются из ряда: 6; 9,5; 12,5; 19; 25; 37,5 Ом.

Номинальный диаметр по изоляции коаксиального кабеля дол- жен быть равен одной из величин следующего ряда: 0.60; 0.87: 1.0: 1.5; 2,2; 2,95; 3,7; 4,6; 4,8; 5,6; 7,25; 9,0; 11,5; 13,0; 17,3; 24,0;

33,0; 44,0; 60,0; 75,0 мм. Допускается разработка и изготовление кабелей с диаметром меньше 0,6 мм.

Коаксиальные кабели в зависимости от номинального диаметра по изоляции разделяют на четыре группы: субминиатюрные – диаметром до 1 мм, миниатюрные – от 1,5 до 2,95 мм, среднега- баритные - от 3,7 до 11,5 и крупногабаритные – более 11,5 мм.

По теплостойкости кабели разделяют на три категории:

* обычной теплостойкости – для температур до 125С включи- тельно;
* повышенной теплостойкости – для температур выше 125С до 250С включительно;
* высокой теплостойкости – для температур выше250С.

Марки кабелей должны состоять из букв (тип кабеля) и трех чи- сел (разделенных тире).

**Первое число** означает величину номинального волнового со- противления.

**Второе число** означает:

* для коаксиальныx кабелей – значение номинального диаметра по изоляции, округленное до ближайшего меньшего целого числа для диаметров более 2 мм (за исключением диаметра 2,95 мм, ко- торый должен быть округлен до 3, и диаметра 3 мм, который округлять не следует);

**Третье** двух- или трехзначное число, первая цифра которого означает группу изоляции и категорию теплостойкости кабеля, а последующее - порядковый номер разработки.

Каждой группе изоляции при соответствующей теплостойкости кабеля присвоено следующее цифровое обозначение:

1. Кабели обычной теплостойкости со сплощной изоляцией;
2. Кабели повышенной теплостойкости со сплошной изоляцией;
3. Кабели обычной теплостойкости с полувоздушной изоляцией;
4. Кабели повышенной теплостойкости с полувоздушной изоля- цией;
5. Кабели обычной теплостойкости с воздушной изоляцией;
6. Кабели повышенной теплостойкости с воздушной изоляцией;
7. Кабели высокой теплостойкости.

К марке кабелей повышенной однородности или повышенной стабильности параметров в конце через тире добавляется буква С.

В марках коаксиальных, защитный покров которых относится к типам, предусмотренными ГОСТ 7006-72, в конце через тире должно быть указано буквенное обозначение типа брони. В тех- нически обоснованных случаях допускается введение дополни- тельных буквенных обозначений, что должно быть оговорено в стандарте или технических условиях на кабель определенной марки.

**Кабели с волновым сопротивлением 50 Ом**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Марка | Затухание дБ/м | |
| 1 ГГц | 10 ГГц |
| РК50-0.6-22 | 1,15 | 9 |
| РК50-1-11 | 1,15 | 4,8 |
| РК50-1-12 | 1,15 | 4,8 |
| РК50-1-21 | 1,06 | 4,4 |
| РК50-1.5-21 | 0,9 | 3,2 |
| РК50-1.5-22 | 1,4 | 2 |
| РК50-2-15 | 0,7 | 1.0\*\*\* |
| РК50-2-16 | 0,7 | 2,6 |
| РК50-3-23 | 0,6 | 1,1 |
| РК50-3-26 | 0,6 | 4.0\*\*\* |
| РК50-4-15 | 0,48 | 2 |
| РК50-4-21 | 0,34 | 1,04 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| РК50-4-111 | 0,5 | 1,25 |
| РК50-7-22 | 0,3 | 1,04 |
| РК50-7-28 | 0,27 | 1,01 |
| РК50-7-29 | 0,17 | 0,68 |
| РК50-9-11 | 0,35 | 1,15 |
| РК50-9-12 | 0,32 | 1,115 |
| РК50-9-23 | 0,3 | 1 |
| РК50-11-11 | 0,3 | 0.55\*\*\* |

**Кабели с волновым сопротивлением 75 Ом**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Марка | Затухание дБ/м | |
| 1 ГГц | 10 ГГц |
| РК75-1-21 | 1,05 | 4,4 |
| РК75-1-22 | 1,03 | 4,45 |
| РК75-1,5-21 | 0,8 | 3 |
| РК75-1,5-22 | 0,9 | 1,35 |
| РК75-2-11 | 0,85 | 1,9 |
| РК75-2-12 | 0,8 | 2,28 |
| РК75-3-13 | 0,5 | 0.90\*\*\* |
| РК75-3-21 | 0,9 | 2,1 |
| РК75-3-22 | 0,52 | 2 |
| РК75-4-18 | 1,2 | 2,3 |
| РК75-4-21 | 0,42 | 2 |
| РК75-4-22 | 0,42 | 2 |
| РК75-7-15 | 0,35 | 1,18 |
| РК75-7-21 | 0,3 | 1,01 |
| РК75-7-22 | 0,3 | 1,02 |
| РК75-9-14 | 0,22 | 1 |
| РК75-9-16 | 0,46 | 1 |
| РК75-9-18 | 0,4 | 0.8\*\*\* |
| РК75-13-11 | 0,115 | 0.2\* |
| РК75-17-17 | 0.35\*\* | - |
| РК75-17-22 | 0,103 | 0.122\*\*\*\* |
| РК75-24-15 | 0,31 | - |
| РК75-24-17 | 0,11 | - |
| РК75-24-18 | 0.36\*\* | - |
| РК75-33-15 | 0,1 | - |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| РК75-33-17 | 0,101 | - |
| РК75-44-15 | 0,101 | - |
| РК75-44-17 | 0,101 | - |

**Зарубежные коаксиальные кабели**

По американской классификации за буквами RG, обозначающи- ми вид кабеля, через дефис следует его номер, состоящий из од- ной - трех цифр. Буквы F, D или C указывают на различные мо- дификации кабеля с тем или иным номером.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Кабель | Внешний диаметр, мм | Волновое со- противление,  Ом | Затухание, дБ/м, на частоте,  МГц | |
| 1000 | 3000 |
| RG-5B/U | 8.4 | 50 | 0.2888 | 0.5479 |
| RG-6A/U | 8.4 | 75 | 0.3675 | 0.689 |
| RG-8A/U | 10.3 | 50 | 0.2625 | 0.5413 |
| RG-9/U | 10.7 | 51 | 0.2396 | 0.5085 |
| RG-10A/U | 12.1 | 50 | 0.2625 | 0.5413 |
| RG-11A/U | 10.3 | 75 | 0.2559 | 0.5413 |
| RG-12A/U | 12.1 | 75 | 0.2625 | 0.5413 |
| RG-13A/U | 10.8 | 75 | 0.2625 | 0.5413 |
| RG-14A/U | 13.8 | 50 | 0.1804 | 0.3937 |
| RG-16/U | 16 | 52 | 0.2198 | 0.5249 |
| RG-18A/U | 24 | 50 | 0.1115 | 0.2789 |
| RG-19A/U | 28.4 | 50 | 0.1148 | 0.2526 |
| RG-29/U | 4.7 | 53.5 | 0.5249 | 0.9842 |
| RG-34A/U | 16 | 75 | 0.1969 | 0.4101 |
| RG-35A/U | 24 | 74 | 0.1148 | 0.2822 |
| RG-55A/U | 5.5 | 50 | 0.559 | 1.0499 |
| RG-55B/U | 5.2 | 53 | 0.559 | 1.0499 |
| RG-58/U | 5 | 53.5 | 0.5741 | 1.2303 |
| RG-58C/U | 5 | 50 | 0.7874 | 1.4764 |
| RG-59A/U | 6.1 | 75 | 0.3937 | 0.853 |
| RG-74A/U | 15.6 | 50 | 0.1969 | 0.3773 |
| RG-218/U | 23 | 50 | 0.1444 | - |
| RG-220/U | 28.4 | 50 | 0.1181 | - |

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов В. М. Линии передачи СВЧ диапазона. – М.:Сайнс- пресс, 2002. – 80 с.

* 1. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов / Под ред. Ю.В. Пименова. — М.: Радио и связь, 2000. — 536 с.
  2. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радио- волн. Учебник для вузов/ Под ред. Г.А. Ерохина. 2-е издание — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 491с.
  3. ФельдштейнА.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П.Справочник по элементам волноводной техники.- М.: Сов. Радио, 1967.
  4. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств; под ред. В.И. Вольмана.- М.: Радио и Связь, 1982.- 328с.
  5. Силаев М.А.,Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. – М.: Советское радио, 1970. – 248 с.
  6. Будурис Ж., Шеневье П. Цепи свервысоких частот: Теория и применение. – М.: Сов. радио, 1970. – 288 с.
  7. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1965. – 718 с.
  8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 434 с.