

4712

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# УСТРОЙСТВА СВЧ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Методические указания  
к лабораторным работам

Рязань 2013



УДК 621.396.67

Устройства СВЧ антенных решеток: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.В. Маторин, Б.В. Кагаленко. Рязань, 2013. 20 с.

Содержат краткие теоретические сведения об устройствах СВЧ, описание программы *MicroWave Office*, порядок выполнения работ.

Предназначены для студентов ФРТ, обучающихся по курсу «Антенны с электронным управлением».  
Ил. 18. Библиогр.: 3 назв.

*Антенные решетки с электронным управлением, устройства СВЧ, автоматизированное проектирование, параметрический синтез*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета ( зав. кафедрой проф. С.Н. Кириллов)

### Устройства СВЧ антенных решеток

Составители: Маторин Александр Васильевич  
Кагаленко Борис Васильевич

Редактор Н.А. Орлова  
Корректор С.В. Макушина  
Подписано в печать 06.09.13. Формат бумаги 60 x 84 1/16.  
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 50 экз. Заказ 2742

Рязанский государственный радиотехнический университет:  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.  
Редакционно-издательский центр РРТУ.

### Цели лабораторных работ

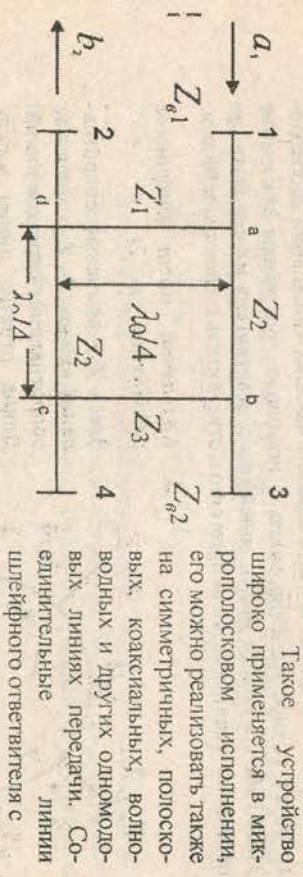
1. Изучение некоторых типов устройств СВЧ, используемых в схемах распределительных трактов антенных решеток.
2. Практическое знакомство с элементами автоматизированного проектирования устройств СВЧ.
3. Приобретение навыков построения машинных моделей устройств СВЧ с использованием библиотек базовых элементов.
4. Приобретение навыков работы с программой *MicroWave Office*, обеспечивающей автоматизированный анализ и параметрический синтез многоэлементных устройств СВЧ.
5. Практическое знакомство с методикой конструктивного синтеза устройств СВЧ.

Лабораторные работы выполняются каждым студентом индивидуально, требуют предварительной подготовки в объеме разделов курса, в которых рассматриваются вопросы применения устройств СВЧ в схемах построения распределительных систем антенных решеток:

- схемы построения распределительных систем антенных решеток на основе закрытого тракта и пространственных распределительных систем;
- математическое моделирование элементов антенных решеток с использованием матричных систем параметров;
- элементы автоматизированного проектирования устройств СВЧ.

### Устройства СВЧ, используемые при выполнении лабораторных работ

#### 1. Шлейфный ответвитель



Такое устройство широко применяется в микроволновом исполнении, его можно реализовать также на симметричных, полосковых, коаксиальных, волноводных и других однодородных линиях передачи. Соединительные линии шлейфного ответвителя с волновыми сопротивлениями  $Z_1, \dots, Z_3$  могут быть выполнены, например, в форме колыца. Длины отрезков этих линий, соединяющих входные и выходные плечи ответвителя, как указано на рис. 1, выбираются равными чет-верти длины волны. Устройство обладает двумя плоскостями симметрии,



следовательно, волны  $v_1$  и  $v_2$  сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ , т.е. такой ответ-  
тель относится к классу квадратурных.

Качественно принцип действия шлейфного направленного ответ-  
вителя можно объяснить следующим образом. Примем фазу волны, посту-  
пающей на вход плеча 1, нулевой. Из плеча 1 часть энергии по пути  $ab$  по-  
ступает в плечо 3, причём волна будет иметь сдвиг по фазе  $\pi/2$ . В плечо 4  
поступает две волны равной амплитуды, одна по пути  $abc$ , а вторая по пути  
 $adc$ . Эти волны синфазны и суммарная волна сдвинута по фазе на  $\pi$ . В плечо  
2 также приходят две волны по путям  $ad$  и  $abc$ , но уже противфазные,  
т.е. плечо 2 оказывается развязанным по отношению плеча 1.

Шлейфный направленный ответвитель обладает ещё одним полез-  
ным свойством: он дополнительно может обеспечивать согласование при  
неравных сопротивлении нагрузок, подключенных к его входному и вы-  
ходным плечам, а также неравное деление мощностей.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $Z_{в1}$  - волновые сопро-  
тивления входов 1 и 2,  $Z_{в2}$  - волновые сопротивления входов 3 и 4,  $Z_1, \dots, Z_2$  -  
волновые сопротивления отрезков, образующих кольцо шлейфного ответ-  
вителя. Если обозначить отношения мощностей на выходе плеч 3 и 4 через  
 $K$ , т.е.  $K = P_3 / P_4$ , то можно показать, что волновые сопротивления  
элементов кольца могут быть определены по следующим формулам:

$$Z_3 = Z_{в2} \sqrt{K}, Z_2 = \sqrt{Z_{в2} Z_{в1} K / (1 + K)}, Z_1 = Z_{в1} \sqrt{K}.$$

Эти соотношения позволяют быстро рассчитать шлейфный  
направленный ответвитель на резонансной частоте. Для определения  
полосы рабочих частот и учета влияния высших типов волн необходи-  
мо более точное моделирование с помощью программы Мисоваве  
Оффис. Рабочая полоса частот шлейфного ответвителя может быть су-  
щественно увеличена, если применить ответвитель с тремя шлейфами.

2. Кольцевой мост (гибридное  
соединение, рис. 2)

Здесь  $Z_{в0}$  - волновые сопротив-  
ления входов,  $Z_1, Z_2$  - волновые  
сопротивления отрезков линий.  
Длина отрезка линии между  
входами 1 и 4 составляет  $3\lambda_0/4$ ,  
остальные линии имеют длину  
 $\lambda_0/4$ .

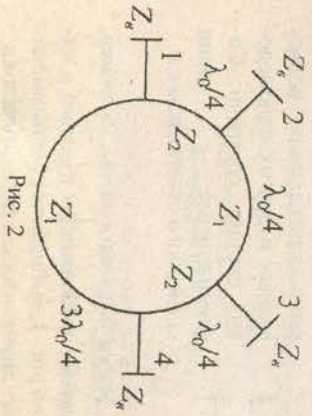


Рис. 2

Кольцевой мост может быть выполнен на основе микрополос-  
ковых, полосковых, коаксиальных или волноводных линий.

Качественно принцип действия кольцевого моста может быть  
рассмотрен на основе следующих рассуждений. Волна, поступающая  
на вход плеча 1, проходит в плечи 2 и 4. Фазовый сдвиг между волна-  
ми в плечах 2 и 1, очевидно, равен  $\pi/2$ , а в плечах 4 и 1 -  $3\pi/2$ . По-  
скольку во втором случае волна проходит по кольцу путь в 3 раза  
больший, следовательно, фазовый сдвиг между волнами на входах 2 и  
4 будет равен  $\pi$ .

Результатирующие амплитуды волн на выходах 2, 3 и 4 опреде-  
ляются суперпозицией 2-х волн, одна из которых, при возбуждении  
входа 1, распространяется от плеча 1 по часовой, а другая - против ча-  
совой стрелки. Эти волны складываются на входах 2 и 4 и вычитаются  
на входе 3. Следовательно, плечи 1 и 3 развязаны. Наличие фазового  
сдвига на величину  $\pi$  между волнами и, проходящим и в плечи 2 и 4, ши-  
роко используется, например, в балансных смесителях и преобразова-  
телях частоты с подавлением тех или иных гармонических составляю-  
щих.

Расматриваемый кольцевой делитель может обеспечить и не-  
равное деление мощностей. Величина мощности, поступающей в каж-  
дое из плеч 2 и 4, зависит от выбора волновых сопротивлений отрез-  
ков, образующих кольцо. На центральной частоте в одном плечом при-  
ближения связь между мощностями  $P_2$  и  $P_4$  на выходах 3 и 4 и волно-  
вым сопротивлениям  $Z_1$  и  $Z_2$  описывается следующими формулами:

$$Z_{в0} / Z_1 = \sqrt{P_4 / P_1}, Z_{в0} / Z_2 = \sqrt{P_2 / P_1}.$$

На центральной частоте сдвиг по фазе между волнами в пле-  
чах 2 и 4 равен  $\pi$ . Если мощность поступает в плечо 2, то

$$Z_{в0} / Z_1 = \sqrt{P_3 / P_2}, Z_{в0} / Z_2 = \sqrt{P_1 / P_2}.$$

В этом случае волны, поступающие на входы 3 и 1, синфазны.  
Приведенные соотношения позволяют рассчитать гибридные  
соединения на центральной частоте, в том числе для случая неравного  
деления мощностей.

3. Дискретные фазовершатели на коммутацион-  
ных диодах

Многополюсные дискретные фазовершатели часто вы-  
полняют в виде отрезка линии передачи, шунтированного в ряде сече-



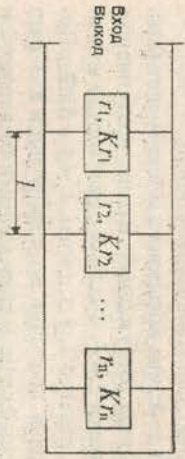


Рис. 3

вещественный параметр качества.

В рассматриваемой схеме отражательного фазовращателя один из коммутационных элементов с низким сопротивлением ( $r \ll 1$ ) закорачивает линию передачи, а остальные элементы имеют высокие сопротивления ( $Kr \gg 1$ ). Они оказывают слабое влияние на фазу коэффициента отражения. При переключении коммутационных элементов фаза коэффициента отражения на входе отражательного фазовращателя изменяется дискретно.

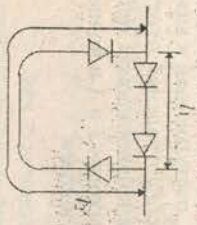


Рис. 4

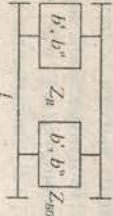


Рис. 5

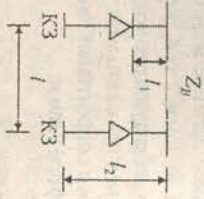


Рис. 6

Проходные фазовращатели должны обеспечивать заданную разность фаз прошедшей волны при двух условиях: согласование входов и минимальное вносимое затухание.

Одним из вариантов таких устройств является проходной диодный фазовращатель на коммутлируемых линиях (рис. 4.)

Изменение фазы коэффициента передачи:

$$\Delta\psi = k_0(l_2 - l_1),$$

где  $k_0$  — постоянная распространения, происходит в результате изменения пути прохождения волны по линии  $l_1$  или по линии  $l_2$ , осуществляемому р-п-диодными и переключаемым. Вносимое ослабле-

ний коммутационными элементами, выполненными на основе р-п-диодов (рис. 3). Идеальный коммутационный элемент характеризуется парой нормированных сопротивлений  $r$  «1 и  $Kr$ », где  $K$  —

ние  $L$  в таком фазовращателе при параметре качества  $K > 100$  слабо зависит от  $\Delta\psi$ .

Фазовращатели на коммутлируемых линиях не рационально использовать при  $\Delta\psi \leq \pi/4$ .

Схема двухпозиционного фазовращателя в виде нагруженной линии изображена на рис. 5. Основными параметрами этой схемы являются: путьгирующие проводимости ( $jb', jb''$ ), электрическая

длина отрезка линии  $l$  и его волновое сопротивление  $Z_g$ . Практически интересен симметричный случай  $b' = -b''$ .

В этом случае обеспечиваются почти одинаковые полубы пропускания в двух состояниях и наилучшая широкполосность. Номиналы элементов схемы определяются по формулам:

$$b' = \text{tg}(\Delta\psi/2), K_0 l = \pi/2, Z_g = Z_{г0} \cos(\Delta\psi/2).$$

Если в качестве коммутлируемых элементов использовать короткозамкнутые отрезки линий (рис. 6), то при  $\Delta\psi < \pi/2$  длина короткозамкнутых отрезков:

$$l_1 = \frac{\text{arctg}(\text{ctg}(\Delta\psi/2))}{2\pi}, l_2 = \frac{l}{2} - l_1.$$

Такие фазовращатели неравномерно использовать при  $\Delta\psi > 45^\circ$ .

Весьма распространены в трактах СВЧ являются проходные фазовращатели мостового типа (рис. 7).

Двухпозиционный фазовращатель образован включением двух инертных отражателей фазовращателей на коммутлируемых выходы действительного

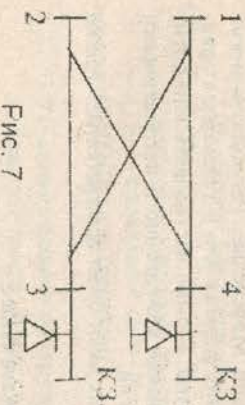


Рис. 7

квадратурного моста СВЧ. При коэффициенте отражения отражательных фазовращателей  $|\Gamma| = 1$  мощность, подаваемая на вход 1, будет проходить на вход 2. Фаза волны, прошедшей на вход 2, определяется фазой коэффициента отражения принимаемых отражательных фазовращателей.



Многопозиционный проходной фазовращатель выполняется в виде каскадного соединения двухпозиционных фазовращателей. Наиболее рациональным по числу диодов является фазовращатель, выполненный по бинарной схеме. В этом случае каскадно соединяются  $P$  проходных секций, первая из которых обеспечивает джексет  $\pi$ , вторая -  $\pi/2$ , третья -  $\pi/4$  и т.д.

Общее число фазовых состояний  $2^P$ , что обеспечивает перекрытие фазы  $0$  -  $2\pi$  с джексетом, который определяется секцией, джошей наименьший фазовый сдвиг. Бинарный фазовращатель может состоять из разнотипных секций. Обычно секции с фазовым сдвигом  $\pi$  или  $\pi/2$  выполняются по мостовой схеме или на коммутируемых отрезках линий, а секции с малым и фазовым сдвигом - в виде фазовращателей на нагруженных линиях.

### Краткие сведения о программе Mkgowave Office

**Mkgowave Office** - это инструмент для анализа высокочастотных устройств, позволяющий автоматизировать процесс их проектирования. **Mkgowave Office** позволяет полностью выполнять проектирование от технического задания до производства не выходя из среды разработки.

При моделировании можно использовать один из методов: линейное моделирование, усовершенствованный гармонический баланс, ряды Вольтерра и 3-мерное электромагнитное моделирование (**EMSign**); в последнем случае анализ устройства базируется на численном решении системы уравнений Максвелла. Результаты могут выводиться в различных графических формах или в таблицах в зависимости от цели проводимого анализа. Можно настраивать или оптимизировать устройства и все изменения немедленно и автоматически отражаются на графиках и в топологии.

При выполнении лабораторных работ будет использоваться только линейное моделирование.

### Запуск программы Mkgowave Office

Чтобы запустить программу Mkgowave Office:

Нажмите команду **Пуск** и выберите **Программы > AWRDE 10 > AWR Design Environment 10** или дважды щелкните на рабочем столе иконку **AWR 11**. Открывается главное окно **Mkgowave Office**, изображенное на рис. 8.

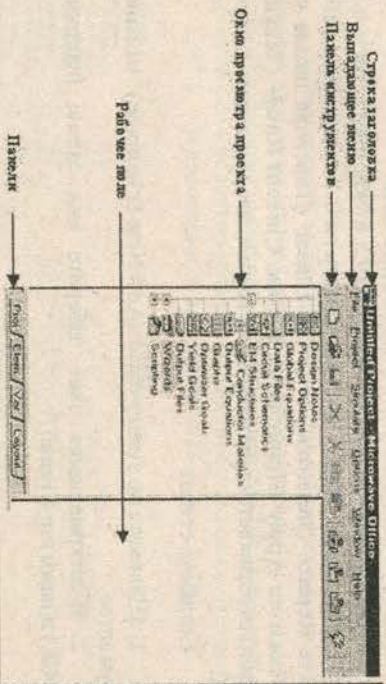



Рис. 8

### Линейное моделирование

Используется для цепей, не содержащих нелинейные элементы. Методом узловых потенциалов рассчитываются комплексные значения коэффициентов матриц рассеяния, сопротивлений, проводимостей и множество других параметров линейных многополюсников, а также параметров произвольных от этих величин (например, КСВ).

#### Моделирование шлейфового ответвителя

Для создания нового проекта

1. Запустите программу **Mkgowave Office**.
2. Выберите **File > New Project** или щелкните по значку  (**New Project**).
3. Выберите **File > Save Project As...**
4. В открывшемся окне **Save As** наберите имя проекта (например, **VRIDGE**) и сохраните его.

#### Установка единиц измерения и диапазона частот

1. Нажмите панель **Project** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно проекта.
2. Дважды щелкните по группе **Project Options** (Опции проекта). Открывается диалоговое окно **Project Options**.
3. Откройте закладку **Global Units**.
4. В окне **Frequency** (Частота) установите **GHz**.
5. В окне **Length** отметьте **Metric Units** и в окне **Length Type** установите **mm**.
6. Откройте закладку **Frequencies** (Частоты).




7. В поле Data Entry Units установите GHz.
8. В поле Modify Range наберите 9.5 в окне Start (Начальная частота), 10.5 в окне Stop (Конечная частота) и 0.1 в окне Step (Шаг), отметьте Kerlase (Заменять), отметьте Linear (Линейная шкала частот). Нажмите Arrly (Применить). В окне Current Range (Текущий диапазон) отображается частотный диапазон и шаг по частоте. Нажмите ОК.

#### Создание схемы

1. Щёлкните по значку  (Add New Schematic) на панели инструментов.
2. В открывшемся окне наберите имя схемы (например, BRIDGE) и нажмите Create.

#### Размещение элементов в схеме

1. Нажмите панель Elements и откройте меню Circuit Elements.
2. Щёлкните по значку + слева от группы Microstrip в окне просмотра элементов.
3. Щёлкните по подгруппе Lines.
4. Найдите модель MLIN, возьмётся полосой прокрутки, затем переместите её в окно схемы и зафиксируйте, щёлкнув левой кнопкой мыши. Повторите операцию для остальных таких же элементов, разместив их в местах, приближенных соответствующим образом к схеме.
5. Щёлкните по подгруппе Junctions в окне просмотра элементов.
6. Найдите модель MMTES (тройник), возьмётся полосой прокрутки, переместите её в окно схемы и зафиксируйте, щёлкнув левой кнопкой мыши. Повторите операцию для остальных таких же элементов.
- Замечание:* ориентацию элемента на схеме можно изменить до его фиксации щелчком правой кнопки. Если элемент зафиксирован, его ориентацию можно изменить, щёлкнув по нему правой кнопкой и выведя в открывшемся меню опцию Rotate.
7. Перемещая мышью элемент, соедините их в схему и добавьте порты в соответствующем порядке. Для добавления порта щёлкните значок  (Port) и присоедините порт к соответствующей точке схемы.
8. Чтобы добавить подложку, щёлкните по группе Substrates (подложки) в окне просмотра элементов.

*Замечание:* тип подложки, необходимой для конкретного типа элементов, можно определить, дважды щёлкнув по этому элементу левой кнопкой; в открывшемся окне редактирования параметров элементов в zakładке Parameters в последней строке

столбца Name будет указан тип подложки (в данном случае — MSUB).

9. Перетащите выбранный элемент в окно схемы, поместите его на свободном месте, например, ниже схемы.
10. Дважды щёлкните по элементу MSUB в окне схемы.

Откроется окно редактирования параметров подложки. Ведите:  $E_r=2.6$  — относительная диэлектрическая проницаемость;

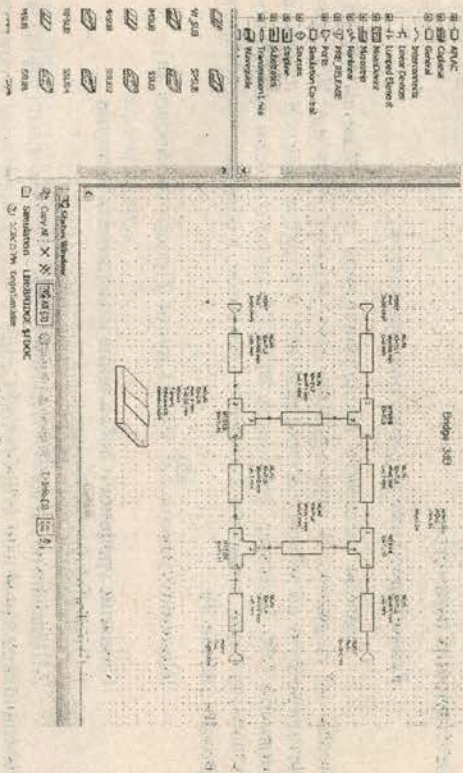


Рис. 9

$H=0.5$  — толщина подложки;  
 $T=0.02$  — толщина проводника;  
 $R_{10}=1$  — удельное сопротивление металла проводника, нормированное к золоту;  
 $Tang=0$  — тангенс угла потерь в диэлектрике подложки;  
 $ErNom=2.6$  — номинальная диэлектрическая проницаемость;


Name=SUB1 — имя подложки.

11. Щёлкните ОК. Схема готова (рис. 9).

#### Расчет параметров элементов схемы


Волновое сопротивление линий, соединяющих порты с элементами моста и линий, обозначенных на схеме TL7 и TL8, должно равняться 50 Ом, что соответствует сопротивлением портов. Волновое сопротивление линий, обозначенных на схеме TL5 и TL6, должно быть близким к  $50 \cdot \sqrt{\epsilon_r}$  (2) Ом. Длина всех линий, соединяющих




тройники  $-L = \lambda / 4$ . Рассчитать ширину (W) и длину (L) линий можно с помощью калькулятора, входящего в состав **Microsoft Office**. Чтобы его открыть, щелкните **Tool** > **FXLine**, введите центральную частоту, параметр подложки, волновое сопротивление линии и элек-трическую длину линии, соответствующую физической длине  $L = \lambda / 4 (90^\circ)$ , и щелкните .


В окнах **Physical Length (L)** и **Width(W)** появятся значения соответствующих параметров.

#### Редактирование параметров элементов

Дважды щелкните последовательно по элементам **MLIN**, чтобы их выделить. В открывшемся окне введите величину W, соответствующую волновому сопротивлению и L-длине каждой линии, и нажмите **OK**. Размеры элементов **MTEE** автоматически примут соответствующие значения (свойство элементов, в обозначение которых входит значок )

Щелкните значок  **View Layout** (Просмотр топологии).

#### Создание графика и добавление измеряемых величин

1. Откройте панель **Project**
2. Щелкните по значку  **Add New Graph** (Добавить новый график) на панели инструментов или **Project>Add Graph** в выпадающем меню. Откроется окно **New Graph**.
3. Введите имя графика (например, **BRIDGE**) в поле **Graph Name** (Имя графика), выберите **Rectangular** (Прямой/угловой) в области **Graph Type** (Тип графика) и нажмите **Create**.
4. Щелкните правой кнопкой мыши по окошку с именем графика (**BRIDGE**) в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement** (Добавить измерение).
5. Выберите **Port Parameter** в списке **Measurement Type**, **S** в списке **Measurement**, **BRIDGE** в поле **Data Source Name**, **1** в поле **To Port Index** (Индекс выходного порта) и в поле **From Port Index** (Индекс входного порта), нажимая на стрелки справа от этих полей, отметьте **DV** в области **Result Type** и **Mag** в области **Complex Modifier**, нажмите **Apply**.

6. Выберите **2** в поле **To Port Index** и нажмите **Apply**.
7. Выберите **3** в поле **To Port Index** и нажмите **Apply**.
8. Выберите **4** в поле **To Port Index** и нажмите **Apply**.
9. Нажмите **OK** (рис. 10).

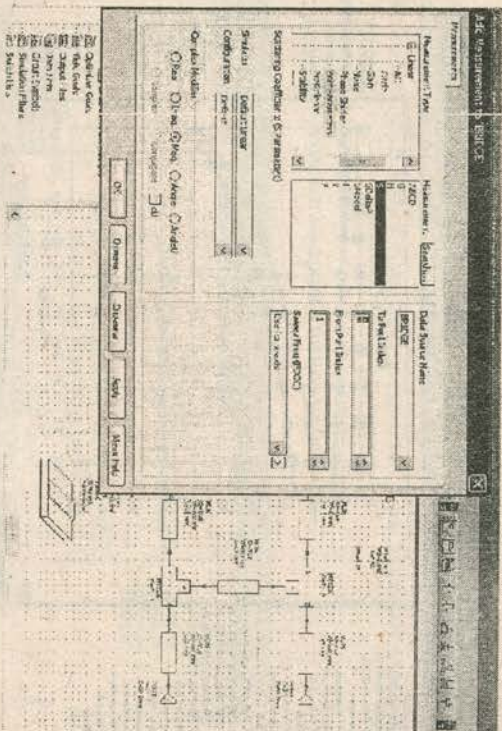




Рис. 10

#### Анализ схемы

Щелкните по значку  **Analyze** на панели инструментов. Резуль-таты анализа отображаются на графике (рис. 11).

Как правило, результаты моделирования не соответствуют требуемым значениям параметров - модули S11 и S21 на центральной частоте должны быть минимальными (обычно не более -30...-50 дБ), а S31 и S41 - около -3 дБ. В этом случае необходимо воспользоваться инструментом **Type** (Настройка), дающим возможность изменять параметры элементов схемы, одновременно наблюдая изменения соответствующих графиков.

#### Настройка схемы

Обычно для настройки достаточно изменить длину и ширину линий, обрабатываемых мост. Целесообразно ввести обозначения (например, L1, W1 и W2), и, щелкнув значок  **Equation**, присвоить им соответствующие значения (например,  $W1 = 1.28$ ). Аналогично записываются уравнения для других параметров (рис. 12). Дайте необходимому значению в окне редактирования численные значения параметров элементов схемы на их обозначения. На рис. 16 обозначение W0 присвоено ширине линий, соединяющих порты с входным оста, а их длина - 5 мм.



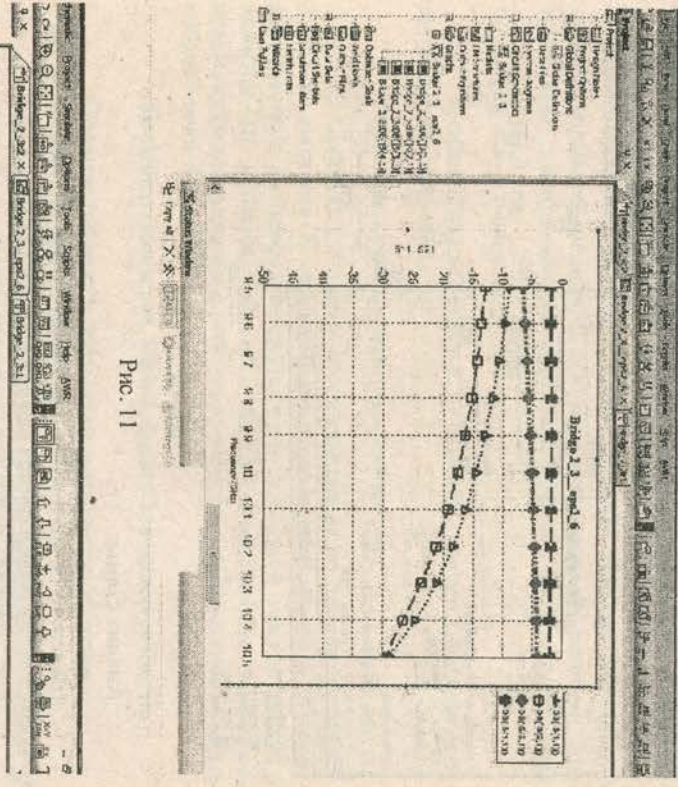


Рис. 11

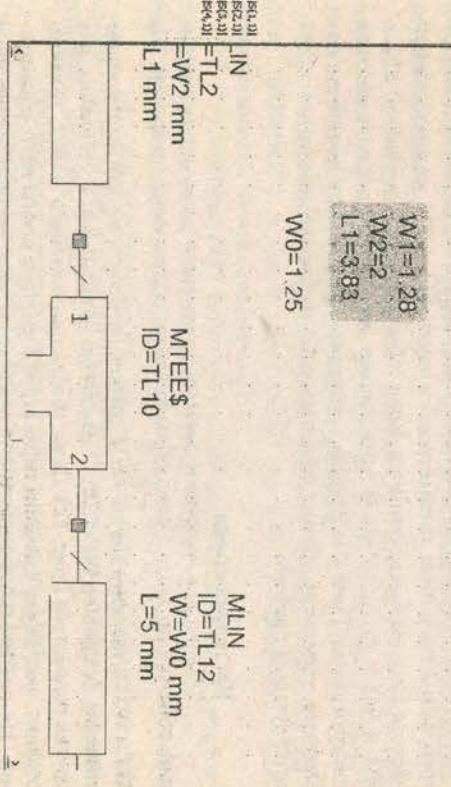




Рис. 12

Щёлкнув значок  T шпе Tool (инструмент настройки) и затем, щёлкнув появившимся в окне схемы инструментом в виде отвертки с крестиком по параметрам, подлежащим настройке, получим возможность изменять эти параметры с помощью инструмента T шпе, который открывается щелчком по значку .

В результате настройки получаем (рис. 13)

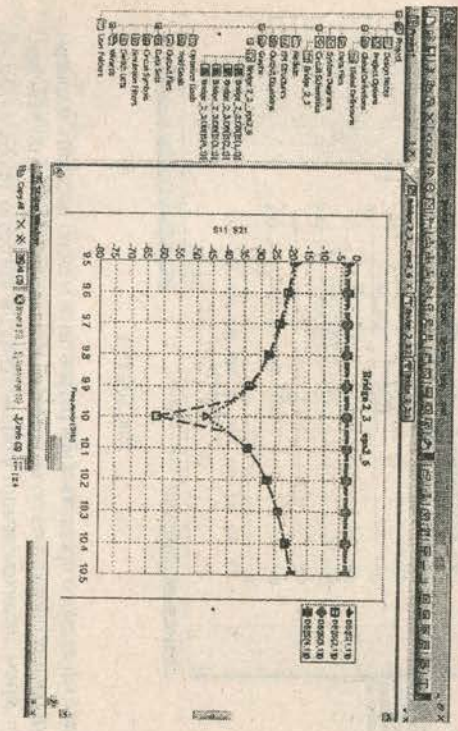


Рис. 13

Чтобы сделать результаты моделирования более наглядными, целесообразно графики, соответствующие параметрам S31 и S41, привязать к правой Y-оси. Для этого, щёлкнув правой кнопкой по полному графику и щёлкнув Proporties, в открывшемся окне положите закладку Meas items, назначьте графикам S31 и S41 флажок в окошке Auto limits, выделите Left 1, в окне Limits уберите флажок в окошке Auto limits и в окошках Min и Max поставьте -70 и -10.

Затем проделайте такую же операцию для правой Y-оси (Right-1), задав пределы -7 и -1. Таким способом достигается удобный вид координатной сетки на графике.

В общем случае число делений на левой и правой осях может быть произвольным; для получения удобного вида достаточно, чтобы соотношение между ними было кратным (рис. 14).



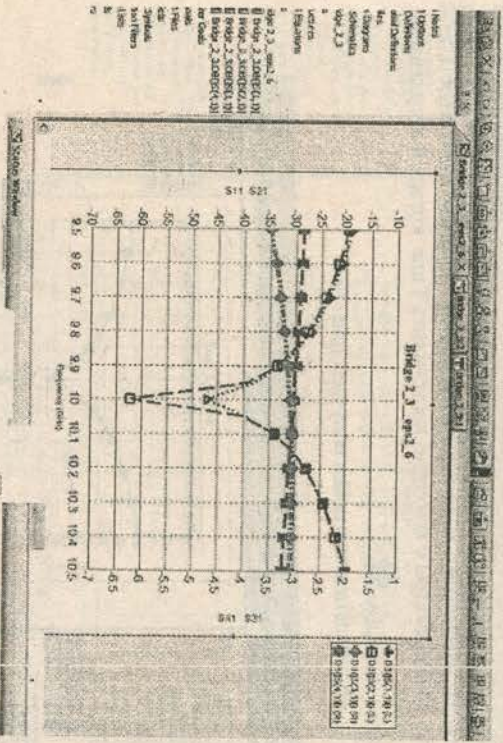


Рис. 14

Для более наглядного представления результатов можно добавить маркеры, щелкнув правой кнопкой по полю графика и выделив опцию **Add Marker**. Затем щелчком мыши указать точку, в которую необходимо поместить маркер.

**Анализ влияния погрешности изготовления элементов схемы**

Среда **Микроталле Оффис** даёт возможность смоделировать влияние неточности изготовления элементов схемы на её параметры. Поскольку разброс параметров при изготовлении изделия носит случайный характер, при моделировании необходимо задать параметры закона распределения ошибки изготовления (например, размера) соответствующего элемента.

Выясним, например, как влияет изменение размера **W** линии **TL2** на параметр **S21**. Для этого:

1. В подгруппе **Graph** примените команду **Toggle Enable** ко всем графикам, кроме **S21**.
2. Вставьте в поле параметров элемента **TL2** значение **W=2 mm**, полученное в процессе настройки моста (рис. 15).

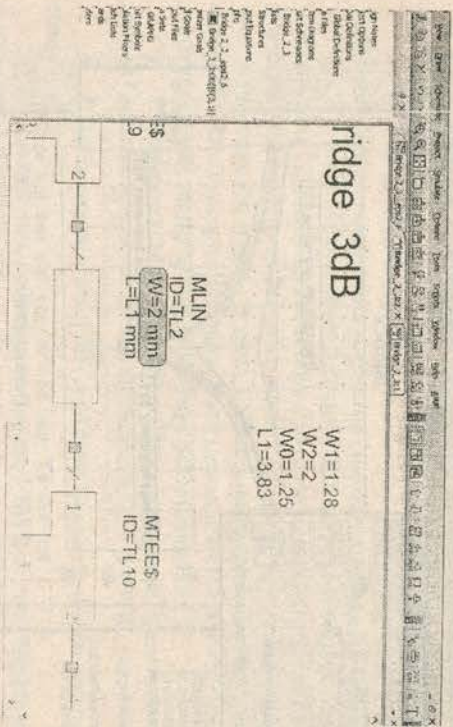


Рис. 15

3. Двухжды щелкнув по элементу **TL2**, откройте окно параметров этого элемента, в нём задачку **Statistics**, отметьте опции **Use 1 In%**, вставьте процент разброса параметров (например, 5) в окошко **tol** (допуск). В окне **Distribution** (закон распределения) имеется возможность применения закона распределения модулируемой величины. Оставьте опцию **Normal** (Нормальный закон распределения).

4. Щелкнув правой кнопкой в поле графика, откройте окно **Properties** и в нём задачку **Yield Data**; щелкните в ней опции **Show T-races**, **Mean**, **Show Range** и в активированном окне выберите опцию **Max/Min**.

5. Щелкните **Simulate>Yield Analysis**.

6. В открывшемся окне **Yield Analysis** введите в поле **Maximum Iterations** число итераций (например, 50) и щелкните кнопку **Start**. В результате моделирования получим графики (рис. 16).

*Замечание: надписи на графике добавлены при его редактировании.*

Как видно, сравнительно небольшое отклонение размера **W** от оптимального (в нашем примере  $\pm 0,1$  мм), приводит к существенному изменению развязки мосту 1-м и 2-м плечам моста. Поэтому при конструировании такого устройства целесообразно начинать размер **W**, при котором величина **S21** будет соответствовать среднему значению развязки.



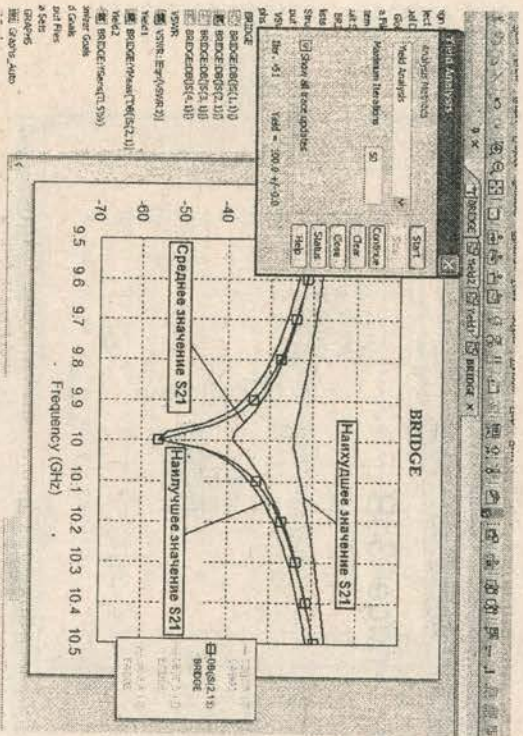


Рис. 16

Построение графика зависимости КСВ от частоты  
 В среде Microsoft Office возможно построение графиков других функций, производных от рассчитанных параметров, например, зависимости КСВ по входам моста от частоты.

Как известно, КСВ (VSWR) связано с коэффициентом отражения (Gamma) :

$$VSWR = (1 + \text{Gamma}) / (1 - \text{Gamma})$$

Поскольку Gamma  $\equiv$  S<sub>ii</sub>, а в процессе моделирования определяется S<sub>ii</sub>, необходимо иметь соотношение, связывающее эти величины. Это реализуется с помощью опции **Output Equations** :

1. В панели **Project** щёлкните правой кнопкой по группе **Output Equations**, затем щёлкните левой кнопкой **New Output Equations**.
2. В открывшемся окне **New Output Equations** введите имя уравнения (например, **VSWR\_eq1**) и нажмите **Create**. Открывается окно **VSWR\_eq1**.
3. Щёлкните **Draw > Add Output Equation**. Открывается окно **Add Measurement Equation**.

4. В окне **Variable name** введите имя новой переменной, тождественной S<sub>ii</sub>, которая будет использована для расчёта КСВ (например, **Gamma2**, если необходимо вычислить КСВ по второму входу многопортового).

5. В окне **Measurement Type** отметьте **Port Parameters** и в окне **Data Source Name** откройте имя источника S<sub>ii</sub> в области **Complex Modifier**.

6. В окне **Measurement Name** введите имя источника S<sub>ii</sub> в области **Complex Modifier** (отметьте **Mag**, 2 в поле **To Port Index** (номер выходного порта) и 2 в поле **From Port Index** (номер входного порта), нажимая на стрелки справа от них, затем нажмите **Apply**). В окне **VSWR\_eq1** появится прямоугольник «прилипший» к курсору. Щёлкните левой кнопкой; в окне **VSWR\_eq1** появится уравнение, связывающее параметры S22 и Gamma2.

7. Нажмите **Ctrl E** и наберите второе уравнение, в котором переменная **Gamma2** используется для вычисления КСВ (VSWR, рис. 17).

8. Щёлкните по значку **Add New Graph** на панели инструментов.

9. Введите имя графика, например, **VSWR** в поле **Graph name**, выберите **Rectangular** в области **Graph Type** и нажмите **Create**.

10. В панели **Project** щёлкните правой кнопкой мыши по названию нового графика и выберите **Add Measurement**.

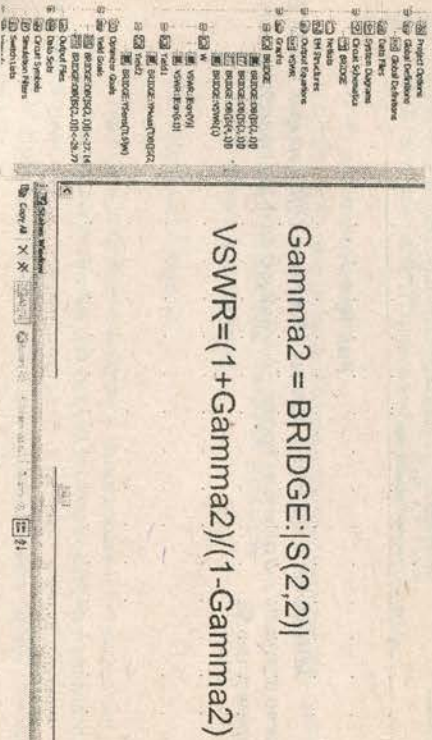



Рис. 17

11. В открывшемся окне **Add Measurement** «VSWR» отметьте **Output Equations** в окошке **Measurement Type**, **Output Equations 1** в окошке **Default Name** и **VSWR** в окошке **Equation Name**. Щёлкните **OK**.

12. Щёлкните правой кнопкой по полю графика, в появившемся окне щёлкните опцию **Properties**, откройте закладку **Label**. В окне **Choose**



Ахв отметьте Left 1 и в окошке Selected Axis Label введите VSWR2. Щёлкните ОК.

13. Щёлкните . Анализ на панели инструментов. Появится график зависимости КСВ от частоты (рис. 18).

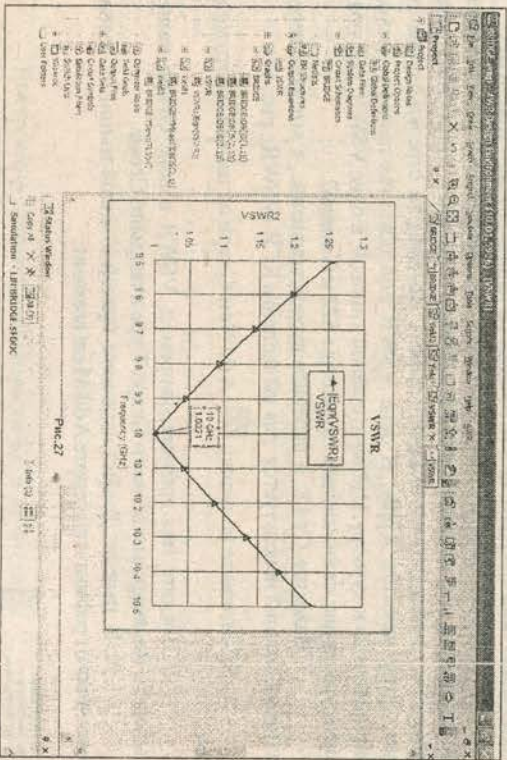


Рис. 18

*Замечание: в последних версиях Микромат Office график для КСВ можно получить значительно проще — с помощью той же процедуры, что, например, для Sii.*

### Порядок выполнения работы

1. Получить индивидуальный вариант задания на выполнение работы у преподавателя.
2. Переписать задание в рабочую тетрадь.
3. Изучить пользовательский интерфейс программы **Микромат Office**.

### Office.

4. С использованием материалов настоящего пособия выполнить предварительный расчёт параметров элементов исследуемого устройства СВЧ. Результаты занести в рабочую тетрадь.
5. Запустить программу **Микромат Office**. Набрать в рабочем окне заданную схему устройства с использованием микроразомкнутых элементов. Рассчитать размеры элементов. Запустить моделирование.
6. С помощью элемента **Type** обеспечить выполнение требуемый, сформулированных в задании.
7. Дополнительные задания:
  - расчёт влияния погрешности изготовления,
  - расчёт зависимости КСВ или КВВ от частоты.
8. Занести результаты моделирования в рабочую тетрадь.

### Отчёт должен содержать:

- 1) схему, исходные данные и результаты предварительного расчёта;
- 2) топологию устройства с указанием размеров;
- 3) результаты моделирования.

### Контрольные вопросы

1. Принцип действия шлейфного направленного ответвителя.
2. Фазовые соотношения для волн на выходе шлейфного направленного ответвителя.
3. Матрица рассеяния гибридного кольца при равных сигналах на выходах.
4. Параметры, обеспечивающие неравное деление мощностей на выходах.
5. Принцип действия гибридного кольца.
6. Матрица рассеяния гибридного кольца при равных сигналах на выходах.



7. Принцип действия и схема реализации дискретного фазовращателя на коммутирuemых линиях.
8. Принцип действия и схема реализации дискретного фазовращателя на основе нагруженной линии.
9. Принцип действия и схема реализации проходных дискретных фазовращателей мостового типа.

#### Библиографический список

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Радио и связь, 1982.
2. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств/под ред. В.И. Волмана. М.: Радио и связь, 1987.
3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курочкин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью программы **Мikrowave Office**, М.: СОЛОН-Пресс, 2003.