

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА»

Кафедра «Радиоуправления и связи»

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

«АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА»

Направление подготовки

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Направленность (профиль) подготовки

«Программно-аппаратная инженерия в телекоммуникациях "интернет вещей"»

Уровень подготовки

Бакалавриат

Квалификация выпускника – бакалавр

Формы обучения – очная

Рязань 2025 г

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. Кирилов)

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. Гатарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

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

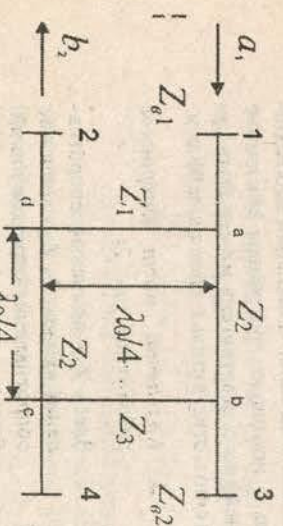


Рис. 1

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

следовательно, волны b_1 и b_2 сдвинуты по фазе на $\pi/2$, т.е. такой ответитель относится к классу квадратурных.

Качественно принцип действия шлейфного направленного ответителя можно объяснить следующим образом. Примем фазу волны, поступающей на вход плеча 1, нулевой. Из плеча 1 часть энергии по пути ab поступает в плечо 3, причем 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 π . 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 ответитель обладает еще одним полезным свойством: он дополнительно может обеспечивать согласование при неравных сопротивлениях нагрузок, подключенных к его входному и выходным плечам, а также неравное деление мощностей.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Z_{a1} - волновые сопротивления входов 1 и 2, Z_{a2} - волновые сопротивления входов 3 и 4, $Z_1, \dots, Z_4$ - волновые сопротивления отрезков, образующих кольцо шлейфного ответителя. 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:

$$Z_3 = Z_{a2} \sqrt{K}, Z_2 = \sqrt{Z_{a2} Z_{a1} K / (1 + K)}, Z_1 = Z_{a1} \sqrt{K}.$$

Эти соотношения позволяют быстро рассчитывать шлейфный направленный ответитель на резонансной частоте. Для определения полюсов рабочих частот и учета влияния вышних типов волн необходимо более точное моделирование с помощью программы Мисоваве Оффис. Рабочая полоса частот шлейфного ответителя может быть существенно увеличена, если применить ответитель с тремя шлейфами.

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

Здесь Z_{a0} - волновые сопротивления 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 $\lambda_0/4$.

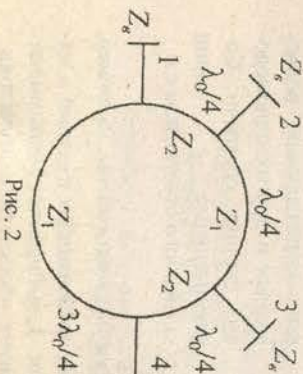


Рис. 2

Кольцевой мост может быть выполнен на основе микроструктурных, плосковых, 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 волнами в плечах 2 и 1, очевидно, равен $\pi/2$, а в плечах 4 и 1 - $3\pi/2$. Поскольку во втором случае волна проходит по кольцу путь в 3 раза больший, следовательно, фазовый сдвиг между волнами на входах 2 и 4 будет равен π .

Результатирующие амплитуды волн на выходах 2, 3 и 4 определяются суперпозицией 2-х волн, одна из которых, при возбуждении входа 1, распространяется от плеча 1 по часовой, а другая - против часовой 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 π между волнами, проходящими в плечи 2 и 4, широкое используется, например, в балансных смесителях и преобразователях частоты с подавлением тех или иных гармонических составляющих.

Расматриваемый кольцевой делитель может обеспечить и неравное деление мощностей. Величина мощности, поступающей в каждое из плеч 2 и 4, зависит от выбора волновых сопротивлений отрезков, образующих кольцо. На центральной частоте в одном плечом приближении связь между мощностями P_2 и P_4 на выходах 3 и 4 и волновым и сопротивлениям Z_1 и Z_2 описывается следующими формулами:

$$Z_{a0} / Z_1 = \sqrt{P_4 / P_1}, Z_{a0} / Z_2 = \sqrt{P_2 / P_1}.$$

На центральной частоте сдвиг по фазе между волнами в плечах 2 и 4 равен π . Если мощность поступает в плечо 2, то

$$Z_{a0} / Z_1 = \sqrt{P_3 / P_2}, Z_{a0} / Z_2 = \sqrt{P_1 / P_2}.$$

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

3. Дискретные фазовращатели на коммутационных диодах

Многопозиционные отражательные фазовращатели часто выполняются в виде отрезка линии передачи, шунтированного в ряде сече-

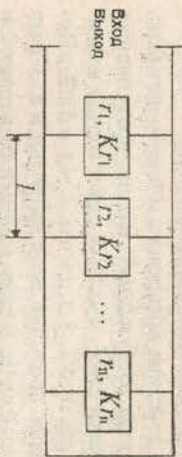


Рис. 3

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.

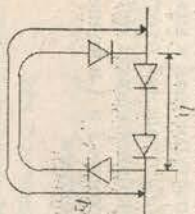


Рис. 4

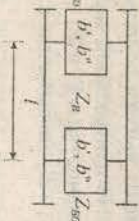


Рис. 5

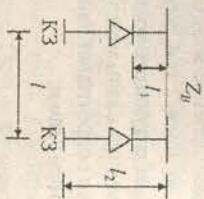


Рис. 6

Прходные 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 коммутируемых 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 , осуществляемого р-п-диодными и переключающими. Вносимое ослабле-

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

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

Схема двухпозиционного фазовращателя в виде нагруженной линии изображена на рис. 5. Основным параметром этой схемы являются: шунтирующие проводимости (jb', jb''), электрическая

длина отрезка линии l и его волновое сопротивление Z_0 . Практически интересен симметричный случай $b' = -b''$.

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

$$b' = \text{tg}(\Delta\psi/2), \quad k_0 l = \pi/2, \quad Z_0 = Z_{00} \cos(\Delta\psi/2).$$

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

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

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

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

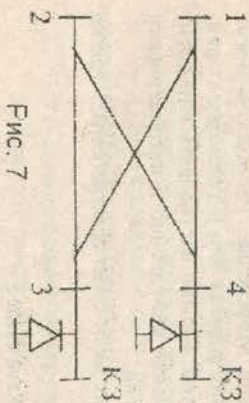


Рис. 7

Двухпозиционный фазовращатель, образованный включением двух идентичных отражателей фазовращателей на коммутационных диодах во взаимно развязанные выходы 3-двухпозиционного 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 применяемых 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 дискрет π , вторая - $\pi/2$, третья - $\pi/4$ и т.д.

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

Краткие сведения о программе Mkgowave Office

Мгегоwave Office - это инструмент для анализа высокочастотных устройств, позволяющий автоматизировать процесс их проектирования. **Мгегоwave 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 (**EM Signit**); 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 томологии.

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.

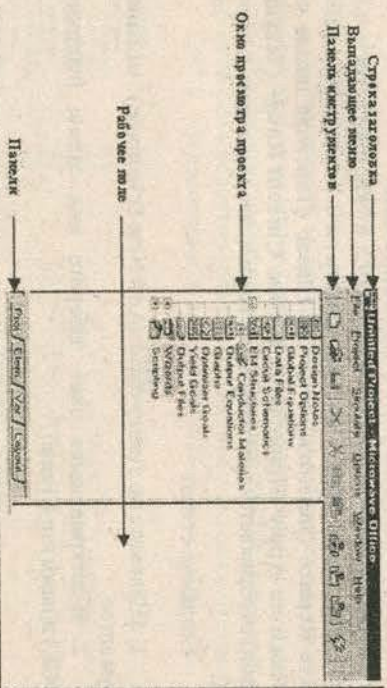


Рис. 8

Линейное моделирование

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

Моделирование шлейфного 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, **BRIDGE**) и сохраните его.

Установка единиц измерения и диапазона частот

1. Нажмите панель **Project** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра 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 **Replace** (Заменить), отметьте **Linear** (Линейная шкала частот). Нажмите **Apply** (Применить). В окне **Current Range** (Текущий диапазон) отображается частотный диапазон и шаг по частоте. Нажмите **OK**.

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 **Meigot v'ir** в окне просмотра элементов.
 3. Щёлкните по подгруппе **Lines**.
 4. Найдите модель **MLIN**, используя полосу прокрутки, затем переместите её в окно схемы и зафиксируйте, щёлкнув левой кнопкой мыши. Повторите операцию для остальных таких же элементов, разместив их в местах, приблизительно соответствующих их расположению в схеме.
 5. Щёлкните по подгруппе **Junctions** в окне просмотра элементов.
 6. Найдите модель **MITEES** (тройник), используя полосу 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, щелкнув 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 щелкнув по этому элементу левой кнопкой; в открывшемся окне редактирования параметров элементов в закладке **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. Введите: $\epsilon_r=2.6$ — относительная диэлектрическая проницаемость;

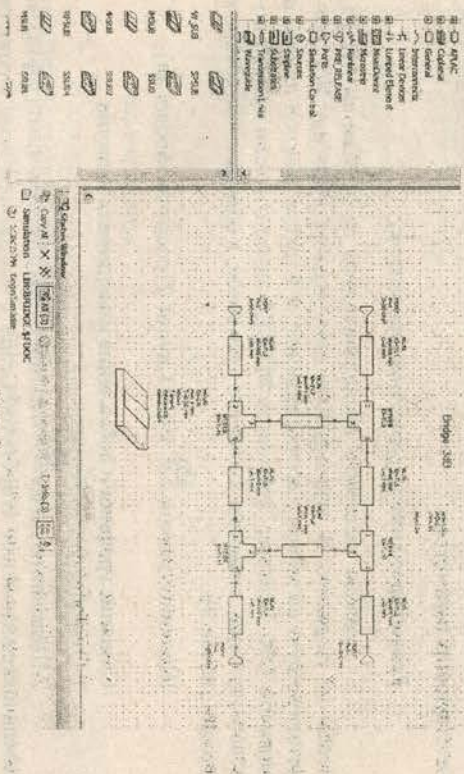


Рис. 9

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

$\text{Name}=\text{SUB1}$ — имя подложки.

11. Щёлкните **OK**. 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 * q(2) Ом**. Длина всех линий, соединяющих

тройкики $-L=\lambda/4$. Рассчитать ширину (W) и длину (L) линий можно с помощью калькулятора, вошедшего в состав **Microsoft Office**. Чтобы его открыть, щелкните **Tools > TCalculator**, введите центральную частоту, параметры подложки, волновое сопротивление линии и элек-трическую длину линии, соответствующую физической длине $L=\lambda/4$ (90°), и щелкните .

В окнах **Physical Length (L)** и **Width(W)** появятся значения соот-ветствующих параметров.

Редактирование параметров элементов

Для редактирования параметров элементов **MLIN**, чтобы их выделить, в открывшемся окне введите величину W , соот-ветствующую волновому сопротивлению и L -длине каждой линии, и нажмите **OK**. Размеры элементов **MTES** автоматически примут со-ответствующие значения (свойство элементов, в обозначении 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 **Resting Point** (Прямой угол) 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), нажав на стрелку 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).

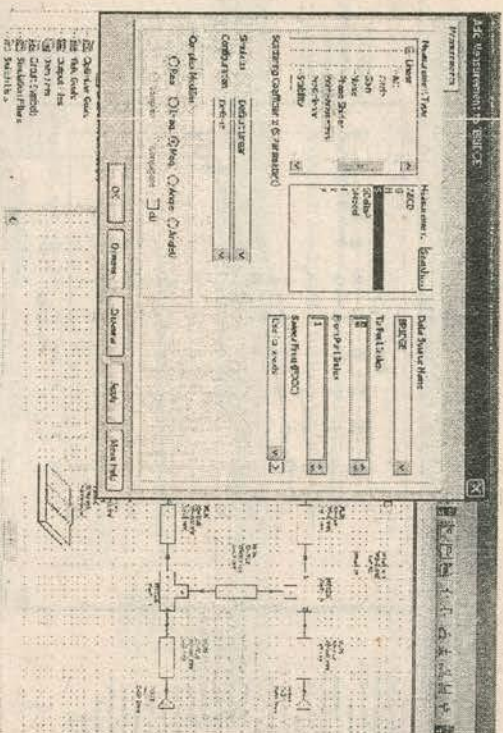


Рис. 10

Анализ схемы

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

Как правило, результаты моделирования не соответствуют требуемым значениям параметров - модули S_{11} и S_{21} на центральной частоте должны быть минимальными (обычно не более $-30 \dots -50$ дБ), а S_{31} и S_{41} - 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, образующих мост. Целесообразно ввести обозначения (например, $L1$, $W1$ и $W2$), щелкнув значок  **Edit Label**, присвоить им соответствующие значения (например, $W1=1.28$). Аналогично записываются уравнения для других параметров (рис. 12). Далее необходимо заменить в окне редактирования численные значения параметров элементов схемы на их обозначения. На рис. 16 обозначение $W0$ присвоено ширине линий, соединяющих порты с входом и оста, а их длина - 5 мм.

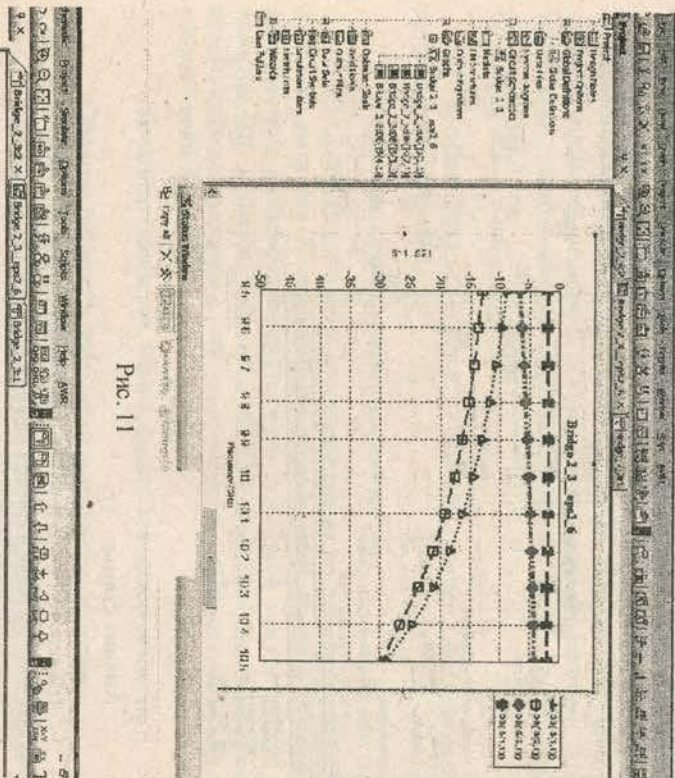


Рис. 11

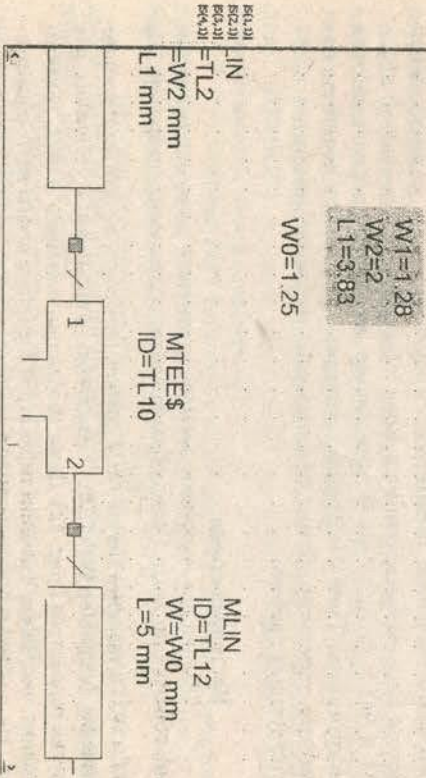


Рис. 12

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

В результате настройки получаем (рис. 13)

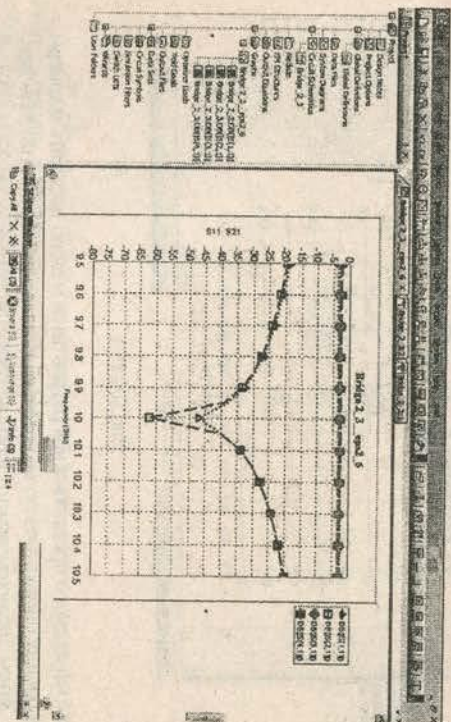


Рис. 13

Чтобы сделать результаты моделирования более наглядными, целесообразно графики, соответствующие параметрам S31 и S41, привязать к правой Y-оси. Для этого, щёлкнув правой кнопкой по полной графике и щёлкнув Properties, в открывшемся окне откройте закладку Measurements, назначьте графикам S31 и S41 положение Right, затем, выделив Left 1, в окне Limits убедитесь 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).

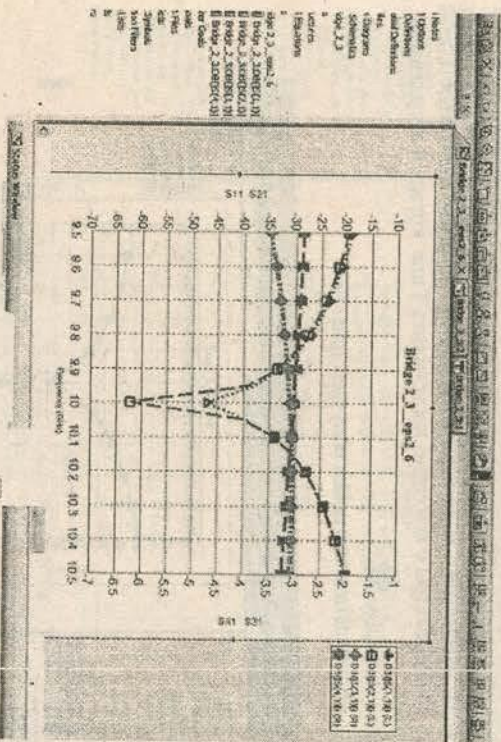


Рис. 14

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 **Мikrowave Office** 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).

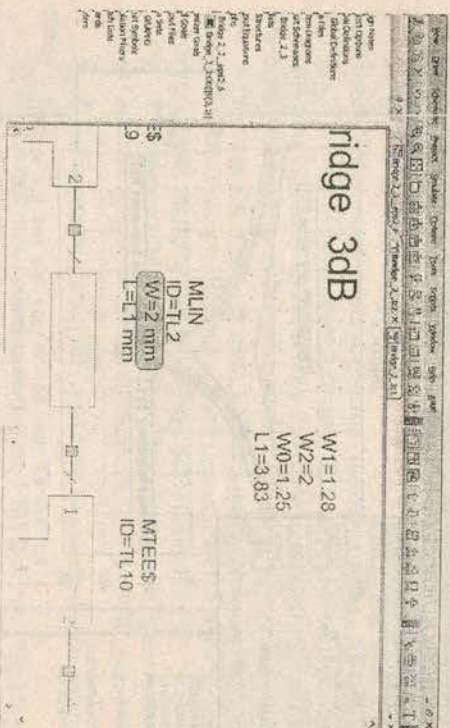


Рис. 15

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

4. Щелкнув правой кнопкой в поле графика, откройте окно **Port-edges** 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 получите графики (рис. 16).

Замечание: надписи на графике добавлены при его редактировании.

Как видно, сравнительно небольшое отклонение размера W от оптимального (в нашем примере ± 0.1 mm) приводит к существенному изменению развязки между 1-м и 2-м плечами моста. Поэтому при конструировании такого устройства целесообразно начинать размер W , при котором величина **S21** будет соответствовать среднему значению развязки.

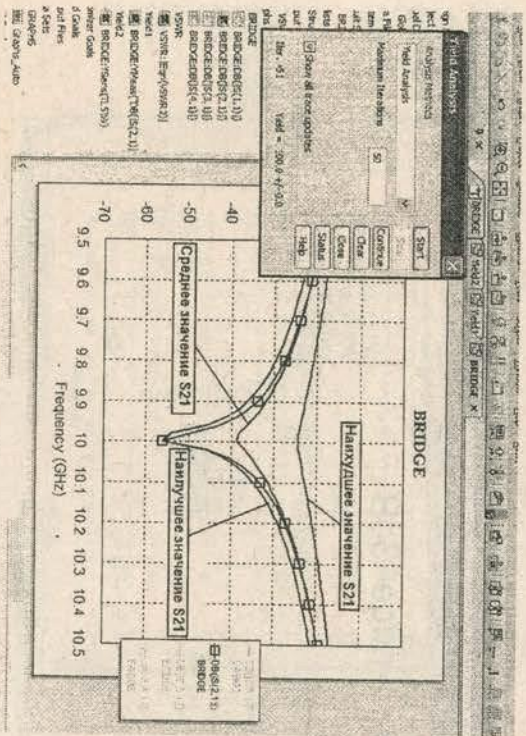


Рис. 16

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 $\text{Gamma} \equiv S_{ii}$, а в процессе моделирования определяется S_{ii} , 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_equ**) и нажмите **Create**. Открывается окно **VSWR_equ**.
3. Щёлкните **Draw > Add Output Equation**. Открывается окно **Measurements**.

4. В окне **Variable name** введите имя новой переменной, тождественной S_{ii} , которая будет использоваться для расчёта КСВ (например, **Gamma2**, если необходимо вычислить КСВ по второму входу мостоподобника).

5. В окне **Measurement Type** выберите **Port parameters** и в окне **Data Source Name** откройте имя источника (в нашем случае – **BRIDGE**).

6. В окне **Measurement** щёлкните **S** 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), нажав на стрелки справа от них, затем нажмите **Apply**. В окне **VSWR_equ** появится прямоугольник, «привинченный» к курсору. Щёлкните левой кнопкой; в окне **VSWR_equ** 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**.



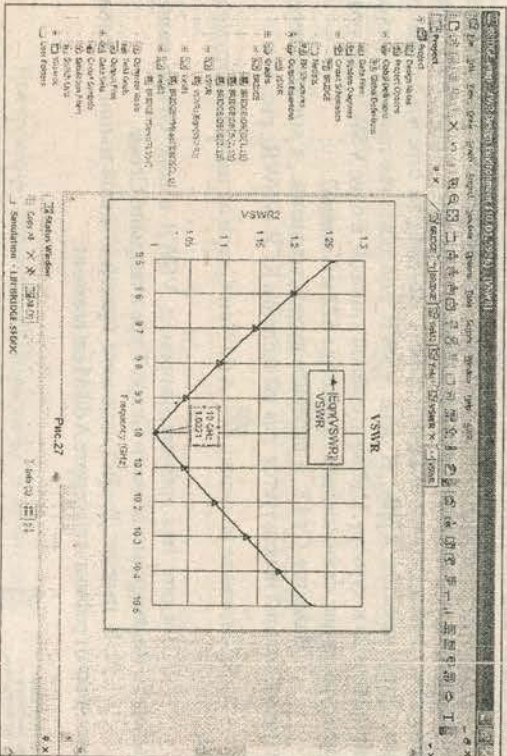
Рис. 17

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

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

Ахв отметьте Left 1 и в окошке Selected Ahv Label введите VSWR2. Щёлкните OK.

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



Замечание: в последних версиях Микроволне Office график для KСВ можно получить значительно проще – с помощью той же процедуры, что, например, для S_{ii}.

Порядок выполнения работы

1. Получить индивидуальный вариант задания на выполнение работы у преподавателя.

2. Переписать задание в рабочую тетрадь.

3. Изучить пользовательский интерфейс программы Микроволне Office.

4. С использованием материалов настоящего пособия выполнить предварительный расчёт параметров элементов исследуемого устройства СВЧ. Результаты занести в рабочую тетрадь.

5. Запустить программу Микроволне Office. Набрать в рабочем окне заданную схему устройства с использованием микромодельных элементов. Расчитать размеры элементов. Запустить моделирование.

6. С помощью элемента T line обеспечить выполнение требований, сформулированных в задании.

7. Дополнительные задания:

- расчёт влияния потерь на готовление
 - расчёт зависимости KСВ или KВВ 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 входах.

7. Принцип действия и схема реализации дискретного фазовращателя на коммутлируемых 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., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью программы Microwave Office, М.: СОЛОН-Пресс, 2003.