

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ  
МОЩНОСТИ**

Руководство к лабораторной работе

2013

Министерство образования и науки РФ  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**  
Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧ и КР)

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_С.Н. Шарангович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ  
МОЩНОСТИ**

Руководство к лабораторным работам по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» для направлений подготовки специалистов 210601.65 – Радиоэлектронные системы и комплексы и магистров 210400.68 – Радиотехника

Разработчики:  
профессор каф. СВЧ и КР Гошин Г.Г.,  
доцент каф. СВЧ и КР Фатеев А.В.

**Содержание**

Введение.....	3
1. Общие сведения о делителях мощности.....	4
2. Расчётное задание .....	11
3. Экспериментальная часть.....	12
Описание лабораторной установки.....	12
Порядок выполнения работы.....	13
Требования к оформлению отчёта .....	14
4. Контрольные вопросы .....	15
Список литературы .....	16
Приложение А .....	17

## ВВЕДЕНИЕ

Руководство включает описание лабораторной работы по дисциплине «Устройство СВЧ и антенны» для исследования делителей мощности в микрополосковом исполнении, а также знакомство с измерительной аппаратурой и методами измерения параметров этих устройств.

Цель работы: изучение принципа действия, конструкции и частотных характеристик делителей мощности (ДМ) и сумматоров мощности (СМ), выполненных в виде отдельных функциональных узлов на основе несимметричных полосковых линий (ПЛ) передачи. Исследования проводятся в дециметровом диапазоне волн с помощью скалярного измерителя параметров цепей P2M-18.

При подготовке к работе студентам следует:

- по конспектам лекций и изучить материал, относящийся к лабораторной работе;
- ознакомиться с описанием работы, продумать ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа выполняется бригадами из двух–трёх человек и рассчитана на самостоятельную внеаудиторную подготовку и два аудиторных занятия (четыре часа). Включать приборы и начинать выполнение работы следует только с разрешения преподавателя после проверки подготовленной схемы и ответа на контрольные вопросы. Во время проведения работы студенты должны вести технический протокол, который может быть общим на бригаду. В начале протокола указывается номер и название лабораторной работы, фамилии исполнителей, номер учебной группы и дата выполнения работы. В протокол заносятся все результаты работы и данные, необходимые для составления отчёта.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ

Двухканальным делителем мощности (ДМ) называют взаимное шестиполосное устройство, делящее мощность СВЧ, поступающую в плечо 3, между двумя выходными плечами 1, 2 (рисунок 1.1). Волновые сопротивления подводящих линий передачи (ЛП) в общем случае разные  $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ .

Сумматоры мощности решают обратную задачу: сложение мощностей входящих СВЧ-сигналов и канализация сигнала суммарной мощности в общую нагрузку. Как правило, ДМ могут работать и в качестве СМ, т. е. рассматриваемые устройства являются взаимными.

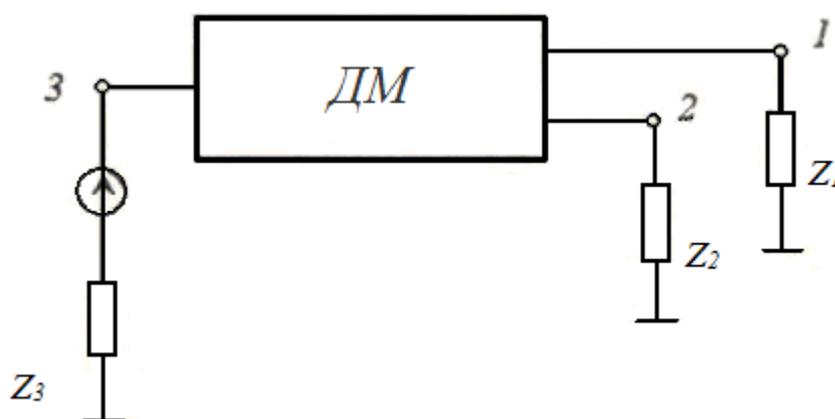


Рисунок 1.1. Двухканальный делитель мощности

Использование  $S$ -параметров в СВЧ диапазоне предпочтительнее, так как их можно не только рассчитать, но и измерить экспериментально. Для описания  $S$ -параметров используются падающие и отражённые волны. Шестиполосник может быть описан матрицей рассеяния:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Для ДМ сопротивления подводящих ЛП должны быть согласованы для получения минимального отражения в каждом канале. В согласованном режиме коэффициенты отражения должны равняться нулю, т.е.  $S_{ij} = 0$  при  $i=j$ . Это означает равенство нулю значений диагональных элементов, т.е. матрица запишется как

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.2)$$

Для описания свойств ДМ используются следующие электрические параметры:

- коэффициент деления мощности  $K = |S_{13}|^2 / |S_{23}|^2$ ;
- вносимые ослабления (дБ)  $C_{13} = 20 \lg(1/|S_{13}|)$ ,  $C_{23} = 20 \lg(1/|S_{23}|)$ ;
- коэффициенты стоячей волны в плечах  $K_{стUi} = (1 + |S_{ii}|) / (1 - |S_{ii}|)$ , где  $|S_{ii}|$  – модуль коэффициента отражения от  $i$ -го плеча ДМ;
- развязка между выходными плечами  $C_{12} = 20 \lg(1/|S_{12}|)$  (дБ);
- разность фаз выходных сигналов  $\varphi = \arg S_{13} - \arg S_{23}$ .

Однокаскадный делитель мощности. Общая схема однокаскадного делителя мощности и его топология представлены на рисунке 1.2.

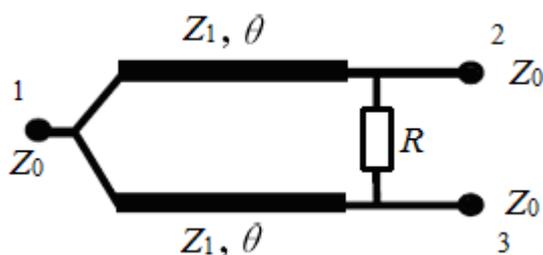


Рисунок 1.2 – Общая схема однокаскадного ДМ

Полосковый однокаскадный ДМ состоит из двух четвертьволновых отрезков линии передачи (ЛП) с волновым сопротивлением  $Z_1$  и электрической длиной  $\theta$ , которые с одной стороны соединены между собой параллельно и подключены к входной линии, а с другой – связаны через сопротивление развязки  $R$ . Теоретически идеальное согласование и развязка обеспечиваются на одной частоте. При определённом выборе сопротивления  $R$  и волновых сопротивлений четвертьволновых отрезков  $Z_1$ , относительно волнового сопротивления подводящих линий  $Z_0$ , можно обеспечить равенство по амплитуде двух указанных сигналов.

Таким образом, плечи 2 и 3 будут развязаны. При этом половина мощности поступает в плечо 1, а половина – рассеивается на сопротивлении  $R$ .

Рассмотрим подробнее основные характеристики ДМ с равным делением мощности, имеющего плоскость симметрии. С помощью метода зеркальных отображений анализ ДМ сводится к анализу двух четырёхполюсников, соответствующих чётному и нечётному типам возбуждения ДМ. Чётный и нечётный режим используется для определения волновых сопротивлений участков ЛП, образующих ДМ, и сопротивлений развязки. В режиме чётного возбуждения ДМ токи через резисторы развязки не протекают, поэтому их можно исключить из схемы, и разделить её вдоль плоскости симметрии. Таким образом, схема упрощается до четырёхполюсника, образованного одиночной ЛП (рис. 1.3 а), нагруженной на активные сопротивления  $Z_0$  и  $2Z_0$ . Согласующий эти сопротивления участок ЛП является трансформирующей секцией, преобразующей сопротивление  $Z_0$  в  $2Z_0$ .

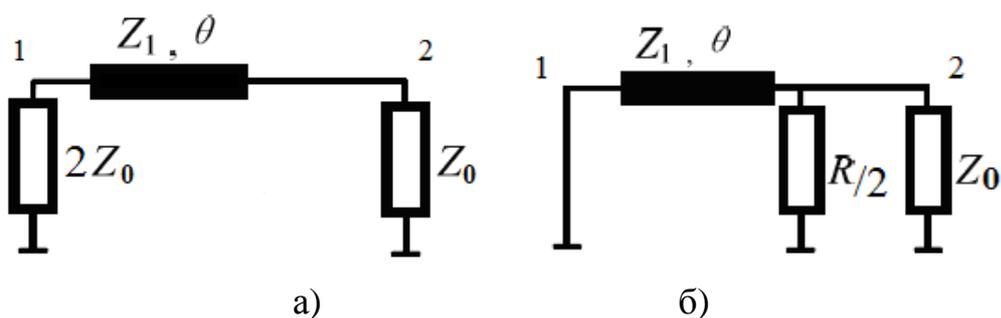


Рисунок 1.3. Схемы чётного и нечётного режимов возбуждения

При нечётном режиме возбуждения вдоль плоскости симметрии на сопротивлениях развязки образуются значительные напряжения. Такой ДМ эквивалентен ЛП (рис. 1.3 б), шунтированной сопротивлением  $R/2$  и с другого конца замкнутой на землю.

Элементы матрицы рассеяния на центральной частоте рабочего диапазона частот  $f_0$  можно определить по формулам:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} + \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right), \quad (1.3)$$

$$S_{33} = \frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2}, \quad (1.4)$$

$$S_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} - \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right), \quad (1.5)$$

где  $Y_1 = Z_0/Z_1$ ,  $Y_2 = 2Z_0/R$ .

Согласование трёх плеч делителя ( $S_{11}=S_{22}=S_{33}=0$ ) и максимальная развязка плеч 1 и 2 ( $S_{12}=0$ ) получаются при  $Y_1 = 1/\sqrt{2}$ ,  $Y_2 = 1$  или

$$Z_1 = Z_0 \cdot \sqrt{2} \quad (1.6)$$

и тогда шунтирующее сопротивление будет равно

$$R = 2 \cdot Z_0. \quad (1.7)$$

Электрическая длина отрезка ЛП, образующего ДМ, равна:

$$\theta = 90^\circ = \frac{\lambda_{cp}}{4\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1.8)$$

где  $\lambda_{cp}$  – длина волны, соответствующая центральной частоте рабочего диапазона ДМ,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

#### Двухканальный делитель мощности с неравным делением мощности

Наряду с равным разделением мощности существует необходимость разделять мощность с различной величиной, для этого применяются ДМ с неравным делением мощности. Схема двухканального делителя мощности с неравным делением представлена на рисунке 1.4.

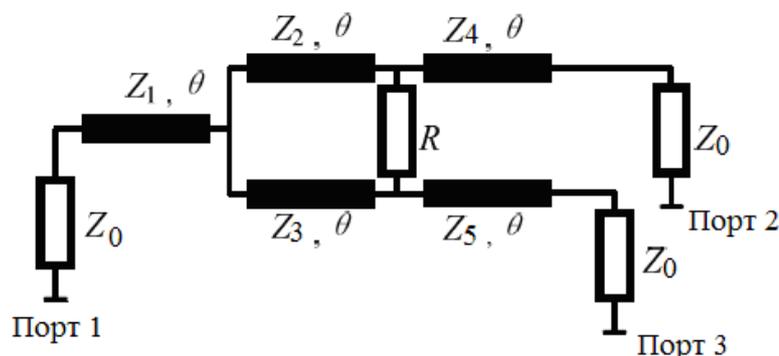


Рисунок 1.4. Общая схема двухканального делителя мощности с неравным делением

На входе и выходе делителя включены четвертьволновые трансформирующие секции с нормированными волновыми сопротивлениями  $Z_1, Z_2, \dots, Z_5$ . Если  $P_2$  – мощность на выходе 2, а  $P_3$  – мощность на выходе 3, то по заданному отношению выходных мощностей  $n^2 = P_3/P_2$ , при условии  $P_3 > P_2$ , можно определить нормированные волновые сопротивления и шунтирующее сопротивление  $R$  делителя мощности: волновое сопротивление трансформирующей секции на входе

$$Z_1 = Z_0 \sqrt[4]{\frac{n}{1+n^2}}, \quad (1.9)$$

где коэффициент деления мощности между каналами  $n = \sqrt{P_3/P_2}$ .

Волновые сопротивления секций

$$Z_2 = Z_0 \sqrt[4]{n^3(1+n^2)}, \quad (1.10)$$

$$Z_3 = Z_0 \sqrt[4]{\frac{1+n^2}{n^5}}. \quad (1.11)$$

Волновые сопротивления выходных трансформирующих секций

$$Z_4 = Z_0 \sqrt{n}, \quad (1.12)$$

$$Z_5 = Z_0 / \sqrt{n}. \quad (1.13)$$

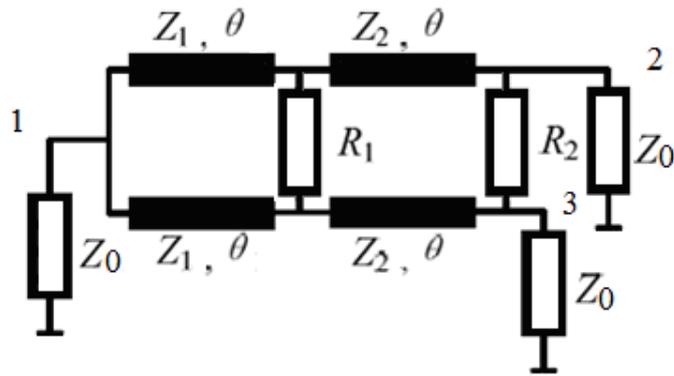
Сопротивление резистора развязки

$$R = Z_0(1+n^2)/n. \quad (1.14)$$

Электрическая длина секций ЛП определяется из условия  $\theta = \pi/2$ .

### Многокаскадные делители мощности

Расширить диапазон частот ДМ можно использованием шестиполюсников, образованных ступенчатыми ЛП с соединёнными друг с другом несколькими резисторами, установленными в каскады (см. прим. рис. 1.5.).



$\theta$  – электрическая длина отрезков однородной ЛП,  $Z_0$  – сопротивление нагрузки входов,  $Z_1, Z_2$  – нормированные волновые сопротивления однородных отрезков ЛП,  $R_1, R_2$  – значение сопротивлений развязки

Рисунок 1.5. Эквивалентная схема двухкаскадного делителя мощности на два канала

Минимальное количество каскадов ДМ определяется из соотношения:

$$n = \frac{\operatorname{arch} \left( \frac{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}}{2\sqrt{2}|\Gamma|_{\max}} \right)}{\operatorname{arch} \left( \frac{1}{\sin(\pi\chi/4)} \right)}, \quad (1.15)$$

где  $\chi$  – относительная полоса пропускания  $\chi = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}}$ ,  $|\Gamma|_{\max}$  – допустимое значение модуля коэффициента отражения.

Электрическая длина ЛП каждого каскада определяется из условия

$$\theta = \pi/2.$$

Для равного деления мощности между выходными каналами расчёт нормированных волновых сопротивлений ЛП и шунтирующих сопротивлений каждого каскада проводится с использованием табл. 1.1. [1].

Таблица 1.1. Электрические параметры ступенчатых делителей мощности

$n$	$\chi$	$ \Gamma_{\max} $	$C_{12}$	$Z_1$	$R_1$	$Z_2$	$R_2$	$Z_3$	$R_3$	$Z_4$	$R_4$
2	2	0,0504	27,41	1,641	1,982	1,220	4,921				
	3	0,1170	19,60	1,586	2,248	1,261	4,024				
3	2	0,0136	39,75	1,791	1,948	1,407	3,933	1,109	10,78		
	3	0,0499	28,20	1,739	2,160	1,739	4,171	1,149	8,308		
	4	0,0915	22,51	1,685	2,365	1,415	4,398	1,187	6,401		
	5	0,1300	18,98	1,638	2,533	1,414	4,763	1,221	5,067		
4	3	0,0208	36,55	1,838	2,118	1,559	3,986	1,273	6,780	1,083	16,12
	4	0,0474	29,11	1,792	2,319	1,544	4,231	1,296	6,794	1,116	1,187
	5	0,0773	24,47	1,746	2,509	1,526	4,419	1,312	6,818	1,147	8,943
	6	0,1070	21,22	1,702	2,658	1,510	4,630	1,325	7,066	1,176	6,985
	7	0,1342	18,84	1,664	2,758	1,497	4,875	1,337	7,558	1,203	5,637

## 2. РАСЧЁТНОЕ ЗАДАНИЕ

Рассчитать геометрические размеры ДМ:

1) Для однокаскадного с равным делением мощности:

подложка – текстолит с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,4$ ; толщина подложки  $h = 1,5$  мм; толщина проводника  $t = 0,05$  мм; центральная частота 2 ГГц; волновое сопротивление 50 Ом.

2) Для однокаскадного с коэффициентом деления, равным 1:3:

подложка – текстолит с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,4$ ; толщина подложки  $h = 1,5$  мм; толщина проводника  $t = 0,05$  мм; центральная частота 2 ГГц; волновое сопротивление 50 Ом.

3) Для многокаскадного с равным делением мощности:

подложка – текстолит с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,4$ ; толщина подложки  $h = 1,5$  мм; толщина проводника  $t = 0,05$  мм; диапазон частот 1-3 ГГц; развязка между выходными каналами более 20 дБ; КСВ < 1,2; волновое сопротивление 50 Ом.

Для расчёта геометрических размеров ДМ использовать программу «Qucs».

Построить модель НО в программе «Qucs» и рассчитать её частотные характеристики.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### Описание лабораторной установки

На рис. 3.1 приведена структурная схема экспериментальной установки, включающая программно-управляемый измеритель модулей коэффициентов передачи (КП) и отражения (КО) P2M-18 диапазона до 18 ГГц.

Измерительный прибор P2M управляется ПК с помощью программы *Graphit*. С выхода СВЧ P2M зондирующий сигнал поступает на датчик КСВ, затем на исследуемый ДМ, один из входов которого нагружен на согласованную нагрузку, а со второго снимается прошедший через НО сигнал на детектор. Продетектированный сигнал поступает на вход P2M. Результат измерения АЧХ модулей КП и КО отображается в программе *Graphit*.

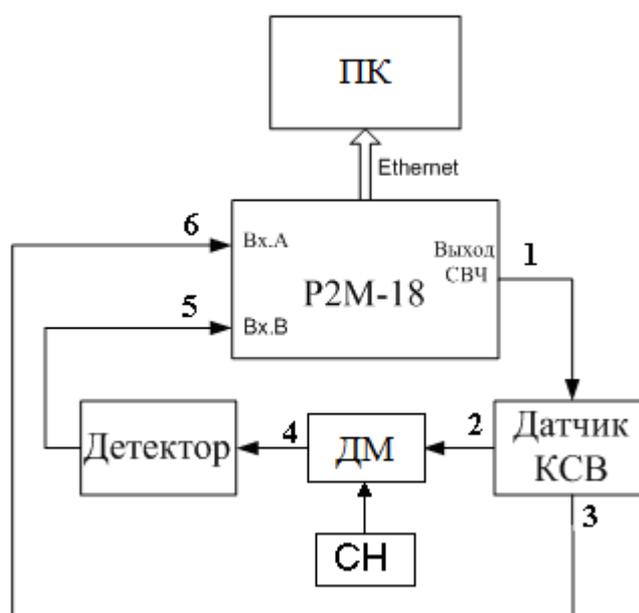


Рисунок 3.1. Структурная схема экспериментальной установки для измерения КП и КО

## Порядок выполнения работы

1. Включить ПК.
2. Включить скалярный анализатор цепей P2M-18, установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение « I » на панели прибора, дать приборам прогреться не менее 5 минут.
3. Для старта ПО Graphit, нажать «Пуск\ВсеПрограммы\Приборы\Микран\Graphit P2M\Graphit P2M».
4. Подключиться к прибору с IP адреса 192.168.1.248.
5. Загрузить профиль «PD.gpr» (см. рис. 3.2 №1).
6. Убедиться. В правильности подгруженных детекторных характеристик.
7. Задать диапазон частот 10...4000 МГц в поле (см. рис. 3.2 №3). Для подтверждения измерения параметра необходимо нажать клавишу «Enter».
8. Повести калибровку прибора P2M (см. прил. А)
9. Запустить и провести измерения (см. рис. 3.2 №2).
10. Измерить параметры матрицы рассеивания трёх макетных образцов.
11. Выключить прибор, остановив процесс измерений, закрыв программное обеспечение Graphit P4M и установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение « O ».

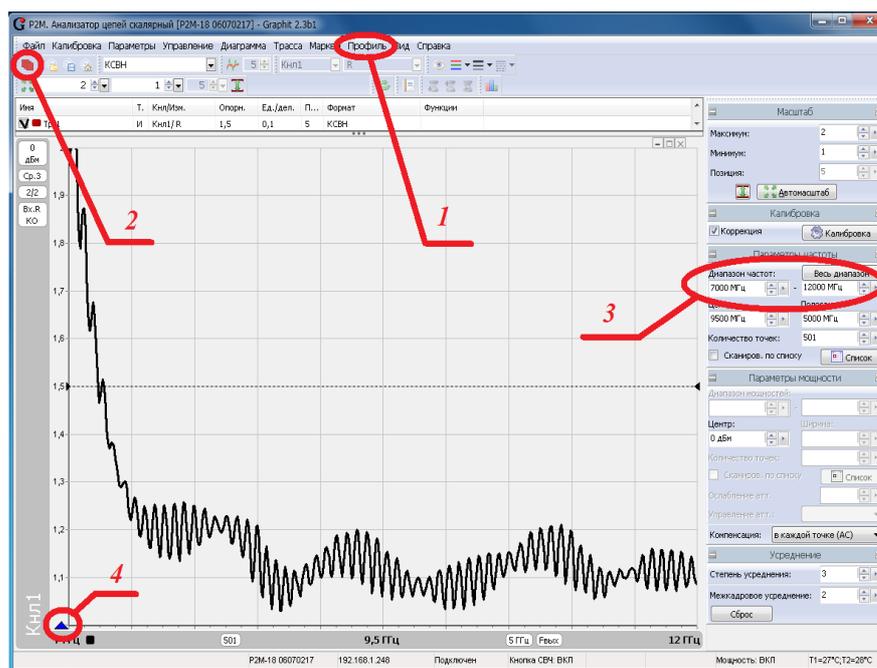


Рисунок 3.2. Окно программы Graphit

### **Требования к оформлению отчёта**

1. Отчёт должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями и правилами оформления отчётов по лабораторным работам, принятыми в ТУСУРе.
2. В отчёте должна быть изложена цель работы, методика измерений и краткое описание экспериментальной установки.
3. Отчёт должен содержать данные по расчётному заданию и измеренным характеристикам с указанием координатных осей, масштаба, значений измеренных величин в характерных точках; анализ результатов измерений (анализ хода характеристик, заключение о рабочем диапазоне частот, сравнение полученных характеристик с ожидаемыми – расчётными, возможные причины их расхождения и др.);
4. В отчёте должны быть представлены выводы по существу проделанной работы.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Делители и сумматоры мощности, их назначение, примеры схем и топологии устройств в микрополосковом исполнении.
2. Устройство и принцип действия ДМ параллельного типа с равным и неравным делением мощности.
3. Каким образом схему делителя мощности можно разбить на две более простые схемы?
4. Основные параметры и характеристики ДМ.
5. Способы достижения необходимого согласования и развязки плеч ДМ.
6. Топология и принцип действия исследованных ДМ.
7. Описать процесс измерения КСВ и ослабления ДМ.
8. Как зависят геометрические размеры делителя мощности от свойств материала подложки?
9. Какой геометрический размер изменится в топологии ДМ, если нижняя граничная частота понизится?
10. Предложите три способа уменьшения размеров топологии ДМ.
11. От каких параметров зависит расхождение экспериментальных частотных характеристик от расчётных?

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) А.М. Богданов, М.В. Давидович, Б.М. Кац. Сверхширокополосные микроволновые устройства. М.: Радио и связь, 2001. – 560 с.
- 2) Антенны и фидеры [Электронный ресурс]: Сборник задач с формулами и решениями / Гошин Г. Г. – 2012. 237 с. – Режим доступа:  
<http://edu.tusur.ru/training/publications/2795>.
- 3) Л.Р. Явич. Вопросы синтеза широкополосных делителей мощности. // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т.17, №8. – с. 1580 – 1585
- 4) Скалярный анализатор параметров цепей P2M [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Гошин Г. Г., Фатеев А. В - Томск: ТУСУР, 2012. - 36 с. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/7048>.
- 5) ОС ТУСУР 01-2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/education/documents/inside/tech\\_01-2013\\_new.pdf](http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/education/documents/inside/tech_01-2013_new.pdf)

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(справочное)

**Калибровка P2M**

Для компенсации влияния амплитудно-частотной характеристики радиоизмерительного тракта на результат измерений применяется калибровка. Под радиоизмерительным трактом понимается: вспомогательные кабели переходы, датчик КСВ, детектор и блоки, находящиеся внутри прибора.

Для калибровки в режиме измерений модуля КО и КП необходимо:

1) собрать схему в соответствии с рисунком А.1, присоединив к измерительному порту датчика КСВ (вход «Изм») нагрузку ХХ;

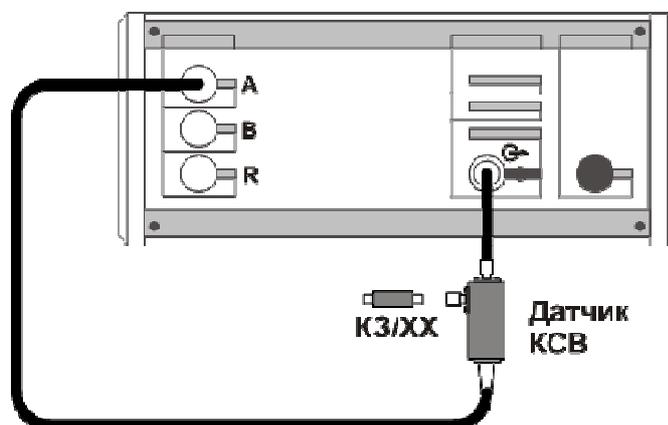


Рисунок А.1. Схема калибровки в режиме измерений модуля КО

2) запустить процесс измерений, при этом на передней панели P2M должен начать светиться индикатор «Мощность»;

3) установить параметры по умолчанию и проверить правильность их установки;

4) выбрать детекторную характеристику для датчика КСВ (S:\Лаборатория СВЧ Электроника\Приборы\Р2М);

5) проверить, чтобы при измерении отражения от нагрузки ХХ на частотной характеристике в диапазоне рабочих частот P2M не было значительных провалов и выбросов;

*Примечание – При наличии на характеристике значительных провалов и выбросов, необходимо проверить надёжность сочленений. Если значительные провалы (выбросы) остались, то необходимо выключить Р2М на несколько минут и перезапустить программное обеспечение.*

б) запустить мастер калибровки «Трс1» (вход – «А», режим измерений – «отражение») и выполнить калибровку, пользуясь указаниями мастера;

7) по окончании калибровки, не отсоединяя нагрузку КЗ от измерительного порта датчика КСВ, определить минимальное и максимальное значения модуля КО или КСВН в диапазоне рабочих частот; они должны находиться в пределах:

а)  $(0 \pm 0,9)$  – формат отображения «Модуль КО (дБ)»;

б)  $(1 \pm 0,1)$  – формат отображения «Модуль КО (раз)»;

в) прямая линия со значением 10 (программное ограничение) – формат отображения «КСВН».

В противном случае калибровку повторить:

а) отсоединить нагрузку КЗ от входа «Изм» датчика КСВ;

б) собрать схему в соответствии с рисунком А.2;

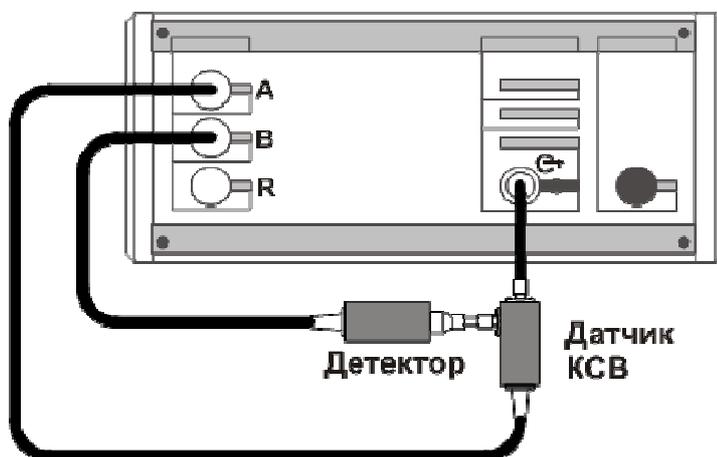


Рисунок А.2. Схема калибровки в режиме измерений модуля КП

8) установить отображение «Трс2». Выбрать детекторную характеристику для используемого детектора (S:\Лаборатория СВЧ Электроника\Приборы\Р2М). Проверить, чтобы при измерении на частотной характеристике не было значительных провалов и выбросов;

*Примечание – При наличии на характеристике значительных провалов и выбросов, необходимо проверить надежность сочленений. Если значительные провалы (выбросы) остались, то необходимо выключить Р2М на несколько минут и перезапустить программное обеспечение.*

9) запустить мастер калибровки «Трс2» (Вход «В», режим измерений – «Модуль КП») и выполнить калибровку, пользуясь указаниями мастера;

10) по окончании калибровки, определить минимальное и максимальное значения модуля КП в рабочем диапазоне частот; они должны находиться в пределах:

а)  $(0 \pm 0,04)$  – формат отображения «Модуль КП (дБ)»;

б)  $(1 \pm 0,01)$  – формат отображения «Модуль КП (раз)».

В противном случае калибровку повторить;

Учебное издание

Гошин Г.Г., Фатеев А.В.

**Исследование характеристик полосковых направленных ответвителей**

Руководство к лабораторной работе

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.,

Тираж            экз.        Заказ

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина. 40.

Тел. (3822) 533018.