

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры  
(КУДР)

## **ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-УЗЛОВ**

Методические указания к выполнению  
лабораторной и самостоятельной работы  
по дисциплине «Основы проектирования микроволновых устройств»

## 1 Введение

В настоящее время при проектировании радиоэлектронных устройств уделяется большое внимание СВЧ устройствам. При этом требуется понимание приемлемых показателей частотных характеристик СВЧ узлов.

Целью настоящей работы является освоение принципов измерения частотных характеристик с помощью векторного анализатора характеристик цепей ОБЗОР-103.

Векторные анализаторы электрических цепей имеют следующие области применения:

- измерение характеристик активных и пассивных радиоустройств, таких как: аттенюаторы, усилители, фильтры, антенны, фидеры, волноводы, преобразователи частоты и многие другие компоненты, используемые в различных схемах. Без преувеличения можно сказать, что векторные анализаторы цепей являются одним из важных факторов развития современных телекоммуникаций;
- измерение уровня поглощения и отражения радиоволн от различных материалов, например элементов конструкции самолётов или ракет, специальных покрытий и красок. Для выполнения этого вида измерений, к портам анализатора цепей необходимо подключить передающую и приёмную антенны;
- измерения в пищевой, химической и медицинской промышленности. Благодаря своей возможности измерять диэлектрическую постоянную, добротность и тангенс угла потерь различных веществ, векторные анализаторы цепей применяются для измерения влажности зерна, качества нефти и множества других важных параметров, которые, на первый взгляд, никак не связаны с радиоизмерениями.

## 2 Краткая теория

При измерении характеристик активных и пассивных радиоустройств (аттенюаторов, усилителей и пр.), а также свойств различных материалов (поглощение и отражение радиоволн, диэлектрическая постоянная и пр.) широко используются векторные анализаторы электрических цепей.

Векторный анализатор электрических цепей – это прибор, который измеряет характеристики прохождения сигнала через тестируемое устройство и характеристики отражения сигнала от его портов. Эти характеристики называются S-параметрами.

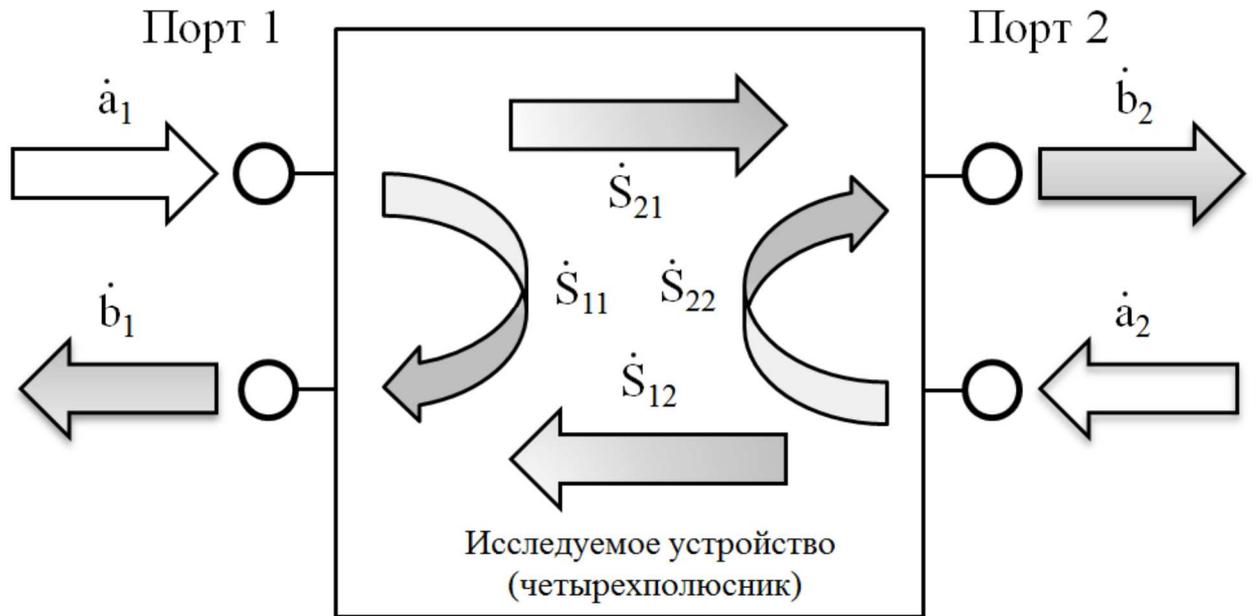


Рисунок 1. – Распространение сигналов при измерении двухпортового устройства (четыреполюсника)

Связь между комплексными коэффициентами передачи  $\dot{S}_{21}$  и  $\dot{S}_{12}$ , комплексными коэффициентами отражения  $\dot{S}_{11}$  и  $\dot{S}_{22}$  и сигналами  $\dot{a}_1$ ,  $\dot{a}_2$ ,  $\dot{b}_1$ ,  $\dot{b}_2$ , определяется системой уравнений:

$$\dot{b}_1 = \dot{S}_{11} \cdot \dot{a}_1 + \dot{S}_{12} \cdot \dot{a}_2,$$

$$\dot{b}_2 = \dot{S}_{21} \cdot \dot{a}_1 + \dot{S}_{22} \cdot \dot{a}_2,$$

где  $\dot{S}_{11}$  – комплексный коэффициент отражения входа исследуемого устройства;

$\dot{S}_{22}$  – комплексный коэффициент отражения выхода исследуемого устройства;

$\dot{S}_{21}$  – комплексный коэффициент передачи исследуемого устройства при прямом направлении зондирования;

$\dot{S}_{12}$  – комплексный коэффициент передачи исследуемого устройства при обратном направлении зондирования;

$\dot{a}_1$ ,  $\dot{a}_2$  – падающие волны при прямом и обратном направлении зондирования соответственно, В;

$\dot{b}_1$ ,  $\dot{b}_2$  – отраженные от входа (выхода) или прошедшие через исследуемое устройства волны, В.

Связь между комплексным коэффициентом отражения и комплексными сигналами и определяется уравнением:

$$\dot{\Gamma} = \dot{b} / \dot{a},$$

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_l - \dot{Z}_0}{\dot{Z}_l + \dot{Z}_0},$$

где  $\dot{\Gamma}$  – комплексный коэффициент отражения (безразмерная величина);

$\dot{a}$  – падающая волна, В;

$\dot{b}$  – отраженная от нагрузки волна, В;

$\dot{Z}_l$  – импеданс нагрузки, Ом;

$\dot{Z}_0$  – опорный импеданс, Ом.

При измерении в прямом направлении считается, что порт 2 нагружен на согласованную нагрузку с коэффициентом отражения  $\dot{\Gamma} = 0$ . В этом случае  $\dot{a}_2 = 0$ , порт 1 возбуждается падающей волной  $\dot{a}_1 \neq 0$ . Величины  $\dot{S}_{11}$  и  $\dot{S}_{21}$  определяются следующими выражениями:

$$\dot{S}_{11} = \left. \frac{\dot{b}_1}{\dot{a}_1} \right|_{\dot{a}_2=0}, \quad \dot{S}_{21} = \left. \frac{\dot{b}_2}{\dot{a}_1} \right|_{\dot{a}_2=0}$$

При измерении в обратном направлении считается, что порт 1 нагружен на согласованную нагрузку с коэффициентом отражения  $\dot{\Gamma} = 0$ . В этом случае  $\dot{a}_1 = 0$ , порт 2 возбуждается падающей волной  $\dot{a}_2 \neq 0$ . Величины  $\dot{S}_{12}$  и  $\dot{S}_{22}$  определяются следующими выражениями:

$$\dot{S}_{22} = \left. \frac{\dot{b}_2}{\dot{a}_2} \right|_{\dot{a}_1=0}, \quad \dot{S}_{12} = \left. \frac{\dot{b}_1}{\dot{a}_2} \right|_{\dot{a}_1=0}$$

Матрица рассеяния связывает падающие и отраженные волны следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \frac{U_{1.отр}}{U_{2.отр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1.пад} \\ U_{2.пад} \end{bmatrix}$$

Для того, чтобы измерить элементы матрицы волн напряжения  $S_{ij}$ , нужно обеспечить полное согласование на противоположном конце. Это достигается либо включением вентиля, либо аттенюатора, либо включение в калиброванную (например, 50-омную) линию.

Эта система параметров используется исключительно часто, поскольку измерительные приборы успешно измеряют отношение напряженности полей.

Каждый S-параметр содержит амплитудно-частотную (АЧХ) и

фазо-частотную (ФЧХ) характеристики тестируемого устройства в соответствующем направлении. Существует много стандартных способов отображения измеренных  $S$ -параметров на экране векторного анализатора электрических цепей. Вы сами можете выбирать, в каком виде просматривать результаты: в виде графика КСВ или обратных потерь от частоты, диаграммы Смита, амплитуды, фазы, вносимого затухания или усиления, групповой задержки и др.

ОБЗОР-13 – это измеритель комплексных коэффициентов передачи или векторный анализатор цепей, предназначенный для измерения  $S$ -параметров радиотехнических устройств. Измеряемые параметры включают комплексный коэффициент отражения  $S_{11}$  и комплексный коэффициент передачи  $S_{21}$ . Для индикации измеряемых  $S$ -параметров используются следующие форматы: логарифм амплитуды, фаза, ГВЗ, КСВ, реальная и мнимая части, расширенная фаза, линейная амплитуда, мощность, полярная диаграмма и диаграмма Вольперта-Смита.

Область применения измерителя — разработка, настройка, проверка различных радиотехнических устройств и компонентов в лабораторных условиях и в условиях промышленного производства, в том числе в составе автоматизированных измерительных стендов.

Измеритель комплексных коэффициентов передачи состоит из измерительного блока, двух измерительных секций, направленного ответвителя. Управляется с помощью специального программного обеспечения. Для подробного изучения калибровки и режимов измерения прибора необходимо ознакомиться с руководством пользователя.



Рисунок 2. – Внешний вид измерителя ОБЗОР-103

Для того, чтобы выполнить измерение, анализатор электрических цепей подаёт на тестируемое устройство синусоидальный сигнал и измеряет сигнал, который отразился и сигнал, который прошёл через устройство. Оба сигнала (отражённый и прошедший) будут отличаться по амплитуде и фазе от тестового синусоидального сигнала. Если анализатор электрических цепей может измерять только амплитуду, то он называется скалярным. Если анализатор может измерять и амплитуду и фазу, то он называется векторным. Практически все современные анализаторы электрических цепей являются векторными, так как именно векторный анализатор позволяет наиболее полно измерить характеристики тестируемого устройства в заданном диапазоне частот.

### **3 Порядок выполнения работы**

В ходе данной работы должны быть освоены основы измерения частотных зависимостей коэффициента передачи  $S_{21}$  и отражения  $S_{11}$  на примере различных типов фильтров.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

3.1 Изучите предложенный в п. 2 теоретический материал и руководство пользователя к прибору ОБЗОР-103.

3.2 Выполните калибровку прибора.

3.3 Подключите к измерительным портам объект исследования (выдается преподавателем).

3.4 Выберите соответствующие режимы измерений на портах для получения графиков зависимостей логарифма амплитуды для коэффициентов  $S_{21}$  и  $S_{11}$  Настройте масштаб по осям, чтобы график занимал большую часть экрана.

3.5 Сохраните результаты измерения в виде текстового файла.

3.6 Определите диапазон рабочих частот для исследуемого фильтра и укажите тип фильтра.

3.7 Определите ослабление сигнала в полосе пропускания и подавление в полосе заграждения.

3.8 Подключите к измерительным портам «черный ящик» и повторите пункты 3.4-3.7.

3.10 Оформите отчет, содержащий титульный лист и разделы: введение, ход выполнения работы, выводы, ответы на контрольные вопросы.

#### 4 Контрольные вопросы

- 4.1 Каков диапазон частот векторного измерителя ОБЗОР-103?
- 4.2 Чему равно минимальное время измерения на одной частоте?
- 4.3 Поясните, что означает термин «векторный анализатор»?
- 4.4 Для чего нужен направленный ответвитель в составе векторного анализатора цепей?
- 4.5 Какие режимы используются при калибровке измерительного прибора?
- 4.6 Что означают параметры  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$ ?
- 4.7 Каким образом перевести значение коэффициента передачи по напряжению из относительных единиц в децибелы?
- 4.8 Запишите формулу для нахождения комплексного коэффициента отражения от нагрузки.