



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Измерения на СВЧ”
(электронный вариант)

Калибровка анализатора цепей СВЧ UVNA-63

Санкт-Петербург
2025³ г.

11. Калибровка анализатора цепей СВЧ UVNA-63

В лабораторной работе студенты знакомятся с методами калибровки анализаторов цепей СВЧ на основе обучающего модульного комплекта векторного анализатора цепей СВЧ фирмы Mini-Circuits.

11.1. Общие сведения об анализаторах цепей СВЧ

В измерительной СВЧ технике наиболее широко представлены приборы для определения частотных характеристик параметров рассеяния СВЧ нагрузок и многополюсных устройств СВЧ. Такие приборы называют многофункциональными *анализаторами цепей СВЧ*, в англоязычном варианте Network Analyzers (NA). Основным принципом действия, используемым в анализаторах цепей СВЧ, является *метод разделения волн*, основанный на выделении сигналов каждой из волн, присутствующих в измерительном

Анализаторы цепей СВЧ делятся на две группы – *скалярные* и *векторные* приборы. Первые имеют более простую структуру, дешевы, но измеряют только модули коэффициентов матрицы рассеяния. По ГОСТ они отнесены к виду Р2 - измерители КСВН и ослабления. Вторая группа – более сложные векторные анализаторы (ВАЦ) – измеряют как модули, так и аргументы соответствующих коэффициентов. Согласно ГОСТ, их обозначают Р4 - измерители комплексных коэффициентов передачи

Современные анализаторы цепей строят так, чтобы измерения выполнялись с плавной перестройкой по частоте и одновременной индикацией частотных характеристик на осциллографическом индикаторе или дисплее. Такие приборы принято называть *панорамными*. Они содержат в своем составе автоматически перестраиваемый генератор, СВЧ тракт, измерительный приемник и индикатор и являются, по сути, измерительной установкой.

Панорамные приборы позволяют автоматизировать процесс измерения частотных характеристик, сводя количество ручных операций до минимума.

В вычислительных анализаторах цепей используют микропроцессорные или компьютерные средства обработки цифровой информации, поступающих с АЦП измерительных каналов прибора. Такие анализаторы называют автоматизированными анализаторами цепей СВЧ (ANA - Automatic Network Analyzers).

Анализатор цепей СВЧ – это прибор для измерения комплексных S-параметров *методом разделения волн*. Метод подразумевает выделение сигналов падающей (A), отраженной (R) и проходящей (T) волн с помощью направленных ответвителей (НО). Затем измеряются комплексные амплитуды и рассчитываются отношения амплитуд R/A, T/A и тем самым определяются коэффициенты отражения и коэффициенты передачи матрицы рассеяния.

Измерительный тракт анализатора цепей включает в себя направленные ответвители, позволяющие разделить падающую и отраженную волну в плече генератора. Для измерения коэффициента передачи предусматривают направленный ответвитель проходящей волны в выходном плече. Пример измерительного тракта для двухпортового узла (четырехполюсника) представлен на рис. 11.1.

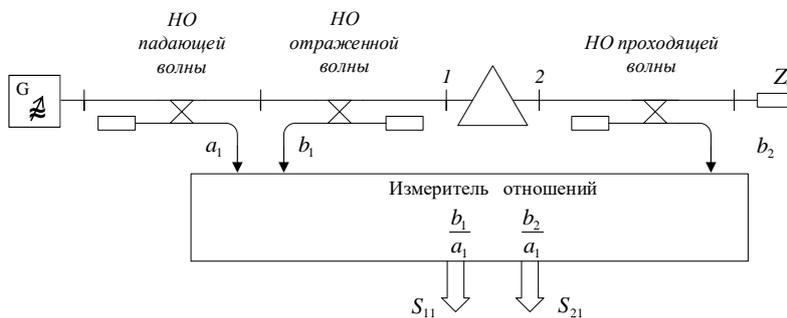


Рис. 11.1. Измеритель коэффициентов передачи и отражения двухпортовых СВЧ устройств

Выделенные сигналы, несущие информацию об комплексных амплитудах падающей a_1 , отраженной b_1 и проходящей b_2 волн, подаются на векторный измеритель отношений, где определяется модуль и фаза измеряемых параметров. Данная схема соответствует измерению элементов S_{11} и S_{21} . Для измерения S_{22} и S_{12} исследуемое устройство надо подключить наоборот: к генератору - плечо 2 – к нагрузке – плечо 1.

Анализаторы с ручным переключением направления передачи называют измерителями коэффициентов передачи и отражения (измеритель R/T - Reflection / Transmission). В более сложных приборах в измерительном тракте используют электромеханические коммутаторы для изменения направления подачи сигнала генератора (переключение активного порта устройства). Это позволяет полностью автоматизировать процесс измерений всех элементов матрицы рассеяния без перекоммутации измерительного тракта (рис. 11.2):

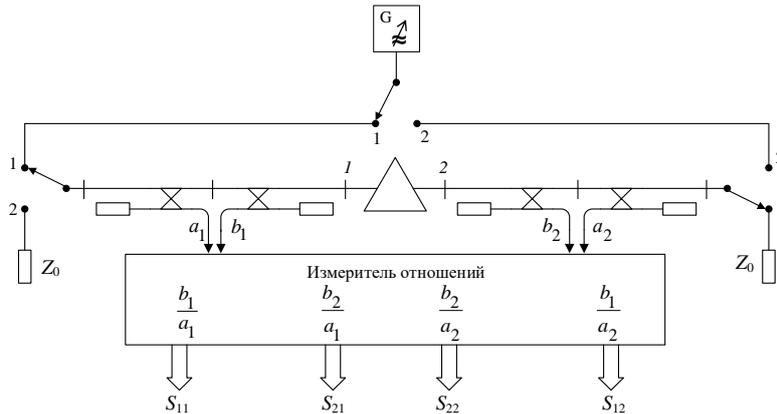


Рис. 11.2. Автоматизированный векторный анализатор цепей СВЧ

Такой вариант ВАЦ исследуется в настоящей работе.

11.2. Калибровка векторных анализаторов цепей СВЧ

Кроме случайных погрешностей определяемых температурной и временной нестабильностью узлов анализатора, данным приборам присущи и систематические погрешности, определяемые неидеальностью элементов измерительного тракта. Эти погрешности могут быть существенно уменьшены при *калибровке* анализатора цепей.

На рис. 11.3 представлены наиболее характерные причины этих погрешностей для измерителя R/T. Это неидеальная направленность НО отраженной волны, рассогласование рабочих входов НО отраженной и проходящей волн, перекрестная паразитная связь портов анализатора. Кроме указанных причин, необходимо учитывать неидентичность частотных характери-

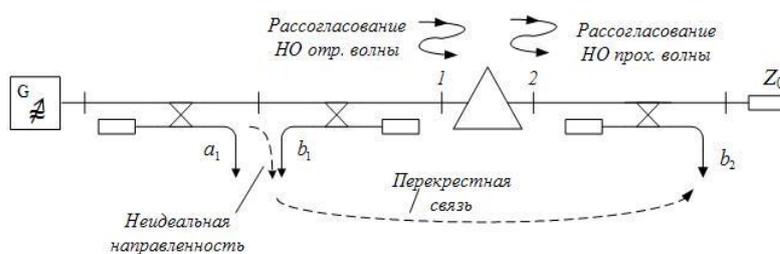


Рис. 11.3. Основные систематические погрешности анализатора цепей СВЧ

стик НО падающей, отраженной и проходящей волн.

Расчетная модель взаимодействия волн в измерительном тракте с учетом неидеальностей его элементов наглядно отображается с помощью

направленных графов для случая СВЧ нагрузок и проходных устройств
(рис. 11.4)

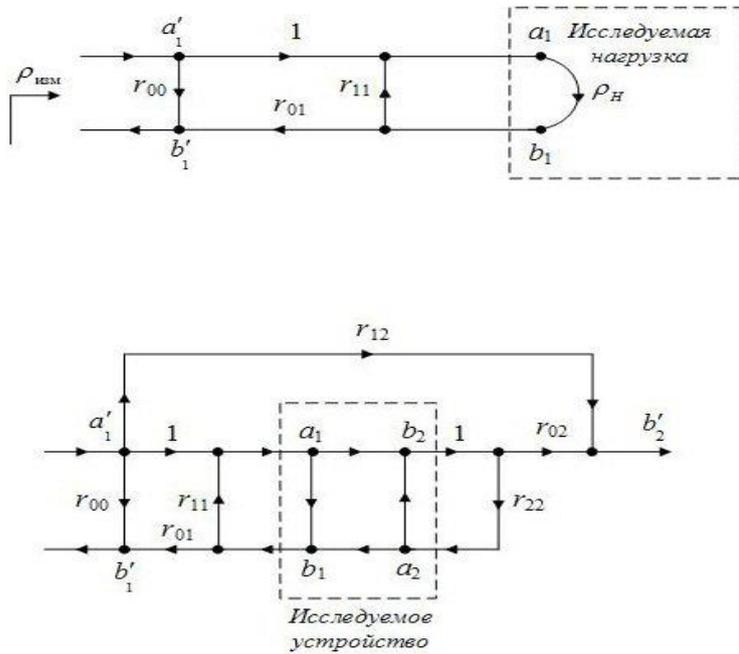


Рис. 11.4. Направленные графы погрешностей рефлектометра и измерителя коэффициента передачи

Направленный граф погрешностей рефлектометра включает следующие ветви: r_{00} – неидеальная развязка НО отраженной волны; r_{11} – рассогласование выхода НО отраженной волны; r_{01} – частотные отличия НО падающей и отраженной волн. Направленный граф двухпортового тракта дополнительно содержит ветви r_{22} – рассогласование входа НО проходящей волны; r_{02} – частотные отличия НО падающей и проходящей волн, r_{12} – ветвь, отражающая паразитное прохождение сигнала падающей волны из порта 1 на вход измерительного порта 2. Таким образом, для измерителя R/T выделяют 6 компонентов погрешностей. Для автоматизированного анализатора с двумя

активными портами используют 12-компонентную схему (с прохождением сигнала в прямом и обратном направлении – рис. 11.5)

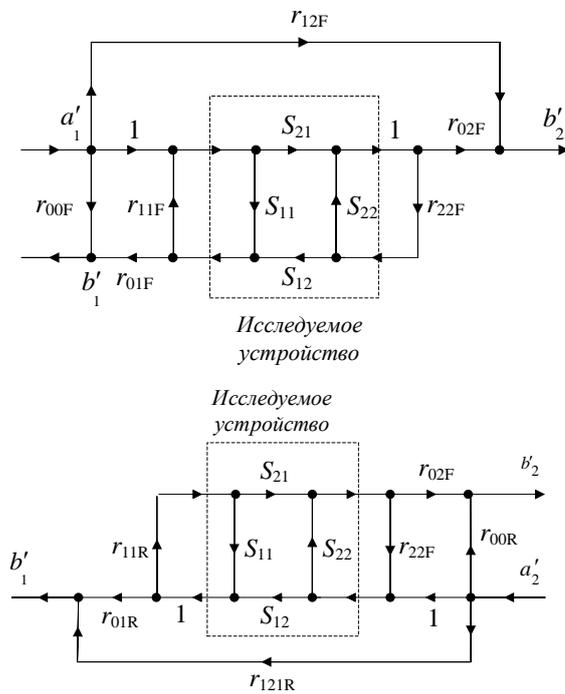


Рис. 11.5. Полная расчетная 12-элементная модель погрешностей автоматизированного анализатора цепей СВЧ

Идея калибровки ВАЦ заключается в следующем. Измеряются реальные параметры эталонных СВЧ узлов. Результаты измерений, включают указанные выше компоненты погрешностей. Затем расчетным путем определяются параметры графа погрешностей. Анализ сигнальных графов позволяет получить поправки, используемые при дальнейших измерениях параметров исследуемых устройств СВЧ. Такая калибровка требует использования вычислительных микропроцессорных приборов и соответствующего программного обеспечения.

Рассмотрим различные методики калибровки по уровню и по фазе которые пригодны и для аналоговых измерителей КСВН и ослабления, а также для векторных анализаторов цепей СВЧ.

Скалярная калибровка аналоговых измерителей R/T производится для двух эталонных элементов – короткозамыкателя (КЗ) и соединения «на проход». Упрощение калибровки заключается в пренебрежении реальными параметрами измерительного тракта $r_{00}, r_{11}, r_{21}, r_{22}=0$ (рис 11.6)

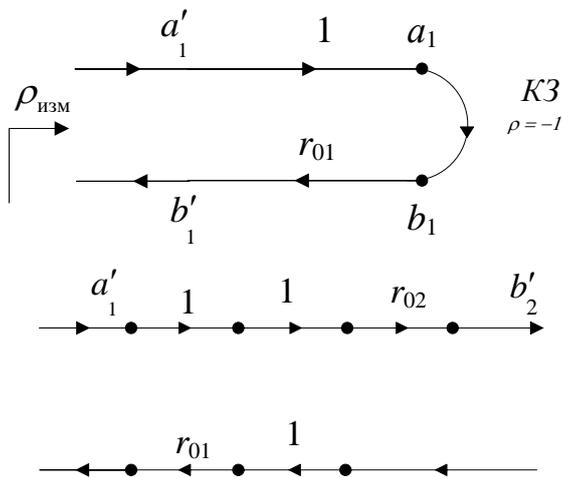


Рис. 11.6. Графы скалярной калибровки первого и второго порта по уровню

Однопортовая калибровка при установке эталона КЗ позволяет учесть разницу АЧХ НО, падающей и отраженной волн

$$|r_{01}| = \left| \frac{b'_1}{a'_1} \right|.$$

Тогда при измерении неизвестного коэффициента отражения нагрузки корректировка опытных данных делается достаточно просто

$$|\rho_H| = \frac{|\rho_{изм}|}{|r_{01}|}$$

Калибровка по уровню «на проход» делается при соединении порта 1 и 2 перемычкой нулевой длины.

$$|r_{02}| = \left| \frac{b_2'}{a_1'} \right|, \quad |\tau_{узла}| = \frac{|\tau_{изм}|}{|r_{02}|}$$

Здесь обозначен $\rho_{изм}$, $\tau_{изм}$ - измеренные значения коэффициента отражения и коэффициента передачи исследуемого узла, ρ_H , $\tau_{узла}$ - скорректированные результаты.

Калибровка аналоговых измерителей R/T по фазе делается аналогичным образом по образцовым нагрузкам КЗ (180-градусная фаза коэффициента отражения)

$$\angle r_{01} = \angle b_1' - \angle a_1' - 180^\circ, \quad \angle \rho_H = \angle \rho_{изм} - \angle r_{01}$$

и по перемычке нулевой длины (нуль фазы коэффициента передачи):

$$\angle r_{02} = \angle b_2' - \angle a_2', \quad \angle \tau_{узла} = \angle \tau_{изм} - \angle r_{02}$$

Векторная калибровка рефлектометра (однопортовая калибровка) делается при установке трех эталонных нагрузок – согласованной (СН), ко-

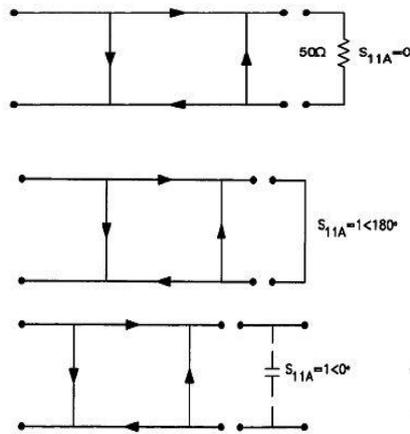


Рис. 11.7. Однопортовая калибровка по СН, КЗ и ХХ

роткозамкнутой (КЗ) и нагрузки холостого хода (ХХ) - на первый порт (рис. 11.7)

Расчетные формулы однопортовой калибровки вытекают из анализа сигнального графа рис. 11.8 при известных калибровочных коэффициентах отражения эталонных нагрузок $\rho_H^{(K)} = \{\rho_{XX}, \rho_{KЗ}, \rho_{CH}\}$

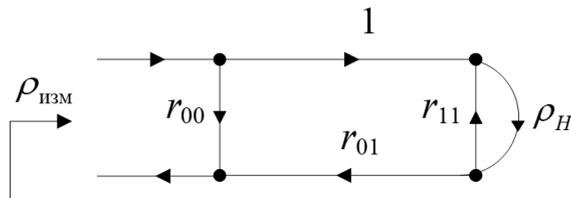


Рис. 11.8. Граф однопортовой калибровки

$$r_{11} = \frac{(\rho_{XX} + \rho_{KЗ} - 2\rho_{CH})}{\rho_{XX} - \rho_{KЗ}}, r_{01} = \frac{2(\rho_{XX} - \rho_{CH}) \cdot (\rho_{CH} - \rho_{KЗ})}{\rho_{XX} - \rho_{KЗ}}, r_{00} = \rho_{CH}$$

Тогда расчетная формула скорректированного результата связывает измеренную величину коэффициента отражения и параметры ветвей графа:

$$\rho_H = \frac{(\rho_{izm} - r_{00})}{r_{11}(\rho_{izm} - r_{00}) + r_{01}}$$

Векторная калибровка коэффициента передачи основана на сигнальном графе, включающем уже найденные ветви при однопортовой калибровке (рис. 11.9) и единичного графа соединения «на проход»:

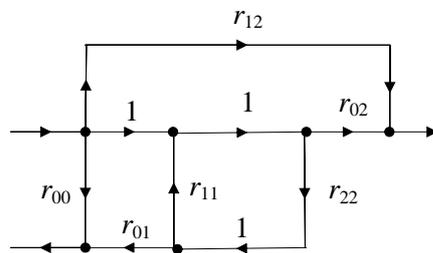


Рис. 11.9. Граф калибровки «на проход»

Для определения элементов графа здесь используют 4 эталонных элемента (КЗ, ХХ, СН и непосредственное соединение). Поэтому такую методику калибровки принято обозначать SOLT (Short, Open, Load, Thru). Измеряя коэффициент отражения и коэффициент передачи при перемычке нулевой длины, определяем недостающие ветви графа:

$$r_{02} = (\tau_{изм} - r_{12})(1 - r_{11}r_{22}), \quad r_{22} = \frac{(\rho_{изм} - r_{00})}{r_{01} + r_{11}(\rho_{изм} - r_{00})}, \quad \text{где } \rho_{изм} = S_{11изм}, \quad \tau_{изм} = S_{21изм}$$

При необходимости (например, при измерении малых коэффициентов передачи) опционально калибруется паразитный канал просачивания сигнала $r_{12} = S_{21изм}$ при установке на оба порта согласованных нагрузок (рис. 11.10):

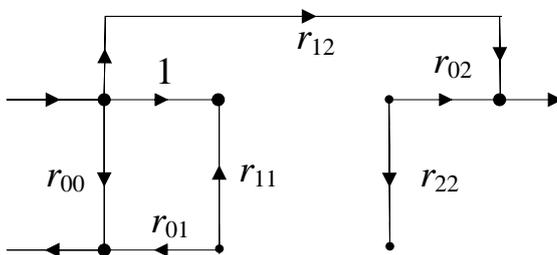


Рис. 11.10. Определение перекрестного просачивания сигнала между портами

Анализ сигнального графа дает аналитические выражения для получаемых при измерении исследуемого узла коэффициентов отражения и передачи в прямом (F) и обратном (R) направлении передачи

$$\rho_N^F = \frac{S_{11}(1 - S_{22}r_{22F}) + S_{21}S_{12}r_{22F}}{D_F}, \quad \tau_N^F = \frac{S_{21}}{D_F}$$

$$D_F = 1 - S_{11}r_{11F} - S_{22}r_{22F} - r_{11F}S_{21}S_{12}r_{22F} + S_{11}r_{11F}S_{22}r_{22F}$$

$$\rho_N^R = \frac{S_{22}(1 - S_{11}r_{22R}) + S_{21}S_{12}r_{22R}}{D_R}, \quad \tau_N^R = \frac{S_{12}}{D_R}$$

$$D_R = 1 - S_{22}r_{11R} - S_{11}r_{22R} - r_{11R}S_{21}S_{12}r_{22R} + S_{11}r_{11R}S_{22}r_{22R}$$

где обозначены нормированные коэффициенты передачи и отражения

$$\rho_N^F = \frac{\rho_{изм}^F - r_{00}}{r_{01}}, \quad \tau_N^F = \frac{\tau_{изм}^F - r_{12}}{r_{02}}, \quad \rho_N^R = \frac{\rho_{изм}^R - r_{00}}{r_{01}}, \quad \tau_N^R = \frac{\tau_{изм}^R - r_{12}}{r_{02}}.$$

Решение обратной задачи позволяет из этих уравнений получить данные матрицы рассеяния исследуемого узла S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} , однако расчетные аналитические формулы довольно громоздки и здесь не приводятся.

11.3. Обучающий модульный комплект векторного анализатора цепей СВЧ фирмы Mini – Circuits UVNA-63

Для модульного векторного анализатора компания Mini-Circuits разработала обучающий комплект модулей, состоящий из набора направленных ответвителей, соединительных кабелей и многопортового трансивера (приемопередатчика) фирмы Vauuag. Модули закреплены на металлической плате (рис. 11.11) для фиксации их положения (что обеспечивает стабильность фазовых соотношений в измерительном тракте). Основным блоком комплекта является активный трансивер (приемо-передатчик), смонтированный в центре платы. Трансивер питается от USB порта компьютера. По этому же интерфейсу происходит управление трансивером и передача данных от трансивера к компьютеру.

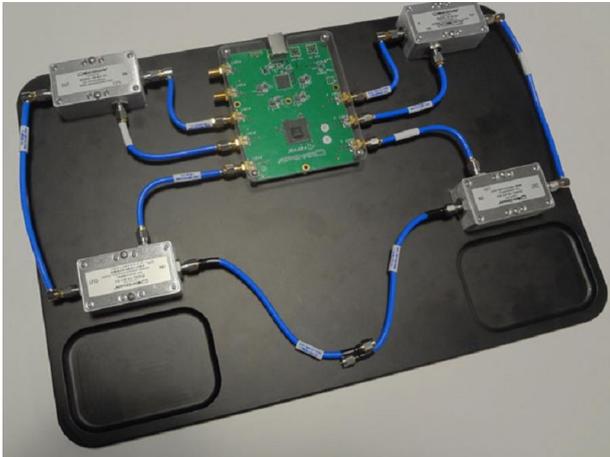


Рис. 11.11. Обучающий комплект в сборе

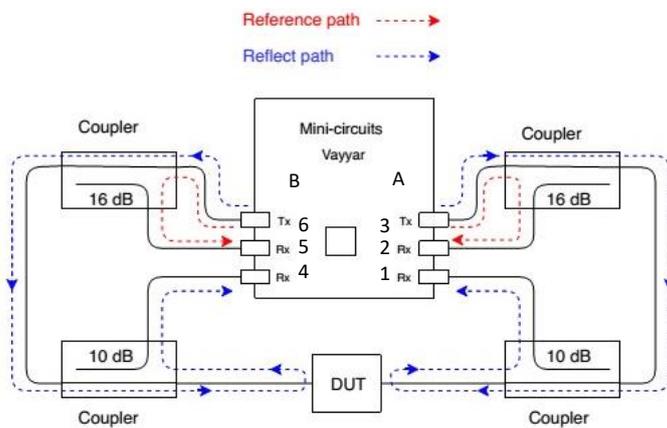


Рис. 11.

12. Пути передачи опорных (выходящих из активных портов) и измеряемых (отраженных и проходящих) волн

Трансивер имеет 6 рабочих портов (рис. 11.12), причем передающие Tx - порты 3 и 6 могут по очереди становится активными. Это позволяет подавать сигнал генератора на разные входы исследуемого устройства (De-

vice Under Test - DUT). Коммутация активных портов осуществляется программным способом электронными коммутаторами трансивера. Приемные Rx - порты 1, 2 и 4, 5 — это порты для ввода измерительных сигналов с направленных ответвителей (НО) на вход приемника трансивера. Для увеличения чувствительности НО отраженных (проходящих) волн имеют меньшее переходное ослабление (10 дБ), чем НО падающих волн (16 дБ). Рабочие параметры трансивера представлены в таблице на рис. 11.13.

Transceiver Electrical Specifications

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Load Impedance	Z_L		50		Ω
Frequency Range	f_{LO}	100		6000	MHz
Isolation between ports	Iso		80		dB
Port Return Loss	RL		-10		dB
TX Output Power Setting	P_{tx_set}	-26		0	dBm
TX Power Step size	P_{tx_step}		2		dB
TX Power @ -10dBm Setting	$P_{tx_10\ dBm}$	-12		-8	dBm
Absolute Maximum Input Power				10	dBm
USB Supply Voltage	V_{SUPPLY}	4.75		5.25	V
Operational Current Consumption	I_{SUPPLY}	0.4		0.65	A
Operating Temperature		18		35	$^{\circ}C$

Рис. 11.13. Параметры трансивера

Фирменное программное обеспечение обучающего комплекта представляет собой программу VNAKit.exe, работающую в 64-разрядных версиях Windows. Интерфейс программы представлен на рис. 11.14.

Программа позволяет установить частотный диапазон измерений в пределах 100...6000 МГц, выбрать уровень выходной мощности генератора (от -26 дБм до 0 дБм), указать количество частотных точек (от 2 до 1001) и полосу пропускания приемника (от 2 до 140 кГц). Возможны два режима измерения – однопортовый (Single – для СВЧ нагрузок) и

двухпортовый (Dual – для многопортовых узлов). Начальное направление подачи мощности генератора (выбор активного порта) делается кнопками Port A или Port B. После запуска программы надо инициализировать связь с компьютером (кнопка INIT). Начало измерений и сохранение результата в файл осуществляется кнопкой RUN

Вывод данных измерения для каждого активного порта делается в разные файлы. Ввод типа файла данных (текстовый в формате *.csv или файл Matlab *.mat), его имя и путь размещения выполняется в пункте меню File. Там же можно сохранить установки программы (State) в файл *.state и загрузить (при необходимости) предварительно сохраненный файл установок.

Формат выходного текстового файла данных похож на формат файлов данных Touchstone, которые используются для ввода результатов измерения в среду моделирования Microwave Office. Однако он содержит не комплексные элементы матрицы рассеяния, а вещественные и мнимые части комплексных амплитуд сигналов на всех 6 портах устройства. Для получения элементов матрицы рассеяния необходимо рассчитать отношение амплитуд 1 и 2 портов (для S_{11}) и 4 и 2 портов (для S_{21}) при активном порте 3 (режим Port A), 4 и 5 портов (для S_{22}) и 4 и 1 портов (для S_{12}) при активном порте 6 (режим Port B). Это делается в программе UVNA-63A.exe, написанной в графической среде программирования Labview.

11.4. Состав лабораторной установки

В него входит обучающий комплект UVNA-63, набор эталонных элементов для калибровки измерительного тракта, фирменный ключ под разъем SMA для сборки и разборки тракта, персональный компьютер с установленной 64-разрядной ОС Windows и LabVIEW 2015 (или, как минимум, модуль LabVIEW Run-Time Engine 2015 32-bit). В первой части работы используются фирменная программа управления комплектом UVNA-63 *VNAKit.exe* и программа обработки файла данных *UVNA-63A.exe*. В качестве объектов исследования использованы два фильтра производства Mini-Circuits:

- 1) фильтр низкой частоты Low Pass Filter VLF-1500+, имеющий частоту среза порядка 1825 МГц. Примерная зависимость затухания от частоты и КСВН фильтра представлены на рис. 11.14;

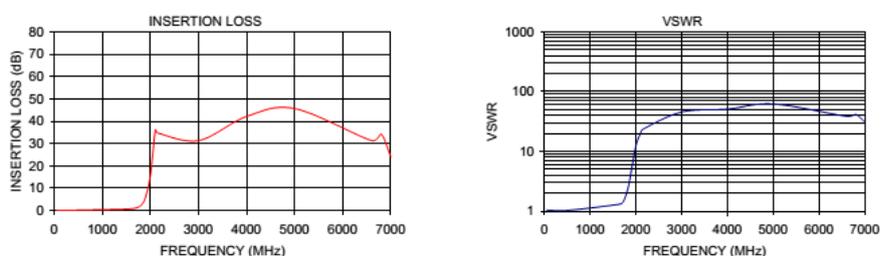


Рис. 11.14. АЧХ фильтра VLF-1500+

- 2) Полосно-пропускающий фильтр Bandpass Filter VBF-2435+ с рабочей полосой частот 2340–2530 МГц (рис. 11.15)

Потери ППФ в центре полосы пропускания порядка 1.5 дБ.

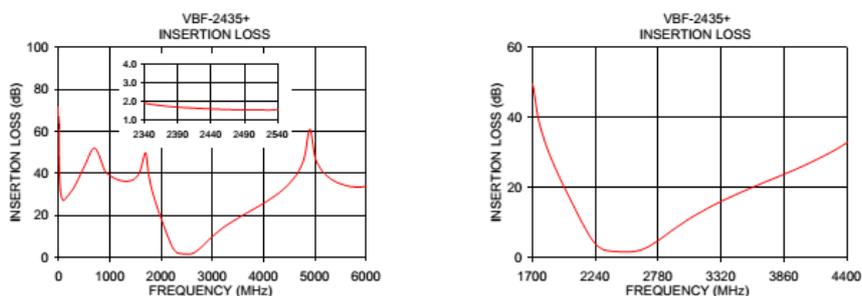


Рис. 11.15. АЧХ фильтра VBF-2435+

Во второй части работы используется программа UVNA_S1P.py, написанная на языке Python. Она предназначена для калибровки и измерения параметров однопортовых устройств (СВЧ нагрузок). В лабораторной работе исследуется кольцевой резонатор с рабочей частотой порядка 2 ГГц.

11.5. Вывод данных измерения в формате Touchstone

«Touchstone» – это один из наиболее популярных форматов файлов, используемый для обмена информацией между измерительной аппаратурой и системами компьютерного моделирования (файл в формате «S1P» и «S2P»). Он представляет собой текстовый файл, в котором содержатся результаты измерения или расчета частотных характеристики СВЧ - многополюсников. В настоящее время этот формат является де-факто стандартом для выходных файлов результатов измерений в анализаторах СВЧ цепей.

Основные правила синтаксиса файлов Touchstone версии 1.1:

- Это текстовый файл, содержащий строки в кодировке US-ASCII;
- Расширение файла .snp, где n- количество портов в устройстве (например, файл данных для СВЧ нагрузки имеет расширение .s1p, для четырехполюсника - .s2p);

- Строки комментариев отмечены знаком (!). Комментарии могут содержать информацию о модели измерительного прибора, объекте измерения, дате и условиях проведения измерения;
- Данные предваряются линией опций формата:

#[HZ/KHZ/MHZ/GHZ] [S/Y/Z/G/H] [MA/DB/RI] [R n]

Она начинается со знака # и указания размерности частоты Hz, MHz, GHz. Второе слово – обозначение параметра (S -матрица рассеяния, Z- матрица сопротивлений и пр.), третье и четвертое - формат вывода (RI – вещественная и мнимая части параметра, MA – модуль и аргумент в градусах, DB – модуль в дБ и аргумент в градусах). Последние два слова- R и число – указывают нормирующее волновое сопротивление портов в Ом (например, #GHZ S DB R 50).

Строки данных имеют формат, зависящий от количества портов:

- 1-port data set (line): *<frequency value> <S₁₁>*
- 2-port data set (line) : *<frequency value> <S₁₁>, <S₂₁>, <S₁₂>, <S₂₂>*

Здесь S_{ij} – данные измерения (пара значений параметра). Отметим, что параметр S₂₁ расположен левее параметра S₁₂. Разделитель в строке – символ пробела или табуляции. Данные частотной зависимости располагаются в виде набора строк, содержащих значения параметров в отдельных частотных точках. Строки располагаются в порядке нарастания частоты.

Пример вывода данных измерения s-параметров СВЧ нагрузки в файл test.s1p:

```
!1-port S-parameter file, three frequency points
# MHZ S RI R 50.0
!freq ReS11 ImS11
1960.0 -0.9554661789037733 0.21069116080795042
1960.5 -0.9550230081033828 0.21259337122739272
1961.0 -0.9545426339171601 0.2146842958674117
```

11.6. Задание и указания к выполнению работы

Часть 1: Измерение АЧХ СВЧ фильтров с калибровкой по уровню

11.6.1. Измерение АЧХ фильтра низкой частоты VLF-1500+ в полном частотном диапазоне

Включите компьютер, запустите программу *VNAKit.exe* и установите связь программы с анализатором цепей (кнопка **INIT**).

Установите полный диапазон частот 100 МГц ... 6000 МГц, уровень мощности -10 дБ, полосу пропускания приемника **RBW** 10 кГц, максимальное количество частотных точек **Number of points** 1001, двухпортовый режим **Dual Port**, активный порт – **Port A**. Укажите путь к файлам данных (**File** => **Settings**=>**Path for result files**), тип файла **File** =>**Settings**=>**Output Format** => **.csv** (текстовый файл с разделителем - запятой).

Подключите между портами А и В исследуемый фильтр. Для этого используйте переход «на проход» типа F-F. Выполните подключение к обучающему набору нажатием кнопки **Init**. Включите режим измерения **Run**. Файл с измеренными данными будет записан в указанную ранее папку с именем, включающем слово «Recording», текущую дату и условные номера набора данных измерения. Полезно сразу переименовать этот файл (например, *VLF-*

1500.csv). 

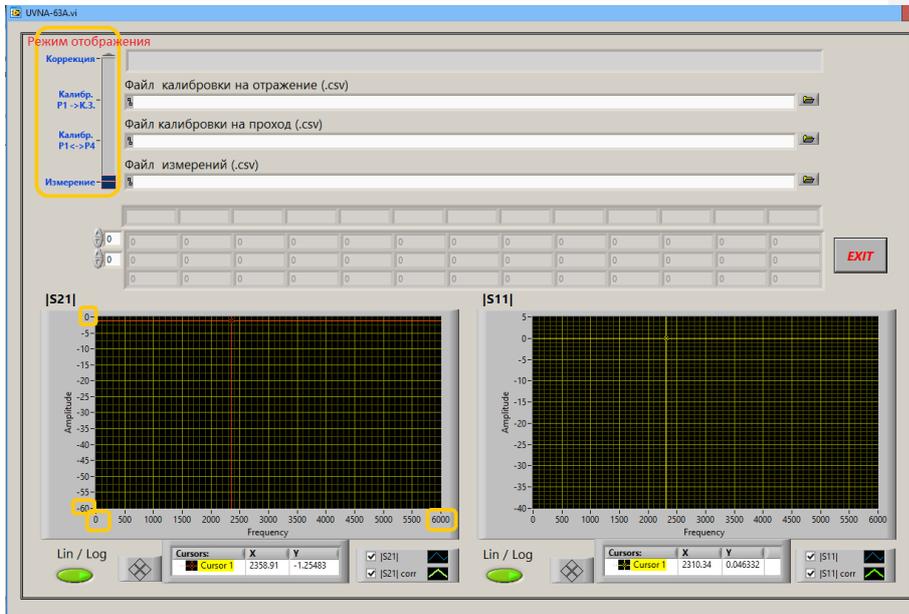


Рис. 11.16. АЧХ фильтра VBF-2435+

Запустите программу *UVNA-63A.exe* и загрузите в нее файл измерений (окно ввода Измерение), рис 11.17. Просмотрите полученные из этого файла результаты измерения модулей S_{11} и S_{21} .

Проведите калибровку измерительного тракта по уровню для расчета скорректированных данных измерения АЧХ.

Калибровка порта источника (порт А) по параметру S_{11} выполняется так:

- Подключите к соединительному кабелю порта А (он справа) короткозамыкатель (КЗ) из набора калибровочных мер.
- Запустите программу измерения кнопкой **Run**. Файл калибровки по КЗ будет создан в указанной ранее папке. Переименуйте файл (например, *Short.csv*).
- Загрузите файл в программу *UVNA-63A.exe* (окно ввода **Калибр. P1=>К.З.**). Просмотрите полученные данные калибровки

Калибровка «на проход» ведется по параметру S_{21} :

- Соедините кабели порта А и порта В с помощью перемычки типа F-F.
- Запустите программу измерения кнопкой **Run**. Файл калибровки «на проход» будет создан в указанной папке. Переименуйте файл (например, *Thru.csv*)
- Загрузите файл в программу *UVNA-63A.exe*, ползунок режима отображения поставьте в положение **Калибр. P1<=>P4**. Просмотрите полученные данные калибровки. Переключите программу на вывод графика скорректированных данных (режим **Коррекция**). На графиках отражаются исходные и скорректированные данные коэффициентов $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$. Измерьте разницу между некалиброванными и калиброванными зависимостями коэффициента передачи в двух точках (на нулевой частоте и на границе полосы прозрачности фильтра). Для этого в выпадающем меню графика S_{21} (вызывается по нажатием правой кнопки мыши в области графика) отключите автомасштабирование по оси Y и вручную установите крупный масштаб в пределах +2 ... -5 дБ. Для изменения масштаба нужно указать ручную минимальное и максимальное значение по оси X и Y нажатием по соответствующей подписи оси. Для измерения разницы графиков используйте курсоры графика, перемещаемые мышью. Если курсоры не видны на экране, введите в окнах X и Y нулевые значения координат.

Верните автомасштабирование графика и измерьте параметры фильтра по графику скорректированных данных: две полосы пропускания по уровням $A_1 = -3$ дБ и $A_2 = -20$ дБ, минимальное и максимальное ослабление фильтра в полосе заграждения. Сравните полученные данные с графиками рис. 11.14. По графику $|S_{11}|$ определите максимальный и минимальный коэффициент отражения в пределах полосы пропускания. Рассчитайте КСВН на входе фильтра в этих точках, переведя значения $|S_{11}|$ дБ в относительные единицы

$$|S_{11}| = 10^{\frac{|S_{11}|_{дБ}}{20}}, \quad KСВН = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

Сделайте копии графиков (скриншоты) и данных $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ (исходных и скорректированных) для отчета по лабораторной работе. Для этого используйте пункты выпадающего меню графиков **Export Simplified** и **Image Export** => **Export Data to Excel**. Сохраните данные в файл с расширением *.csv*. Постройте в Excel графики полученных зависимостей. 

11.6.2. Измерение АЧХ ППФ VBF-2435+

Методика измерений параметров полосно-пропускающего фильтра аналогична указанной выше, но измерения проводится в более узком диапазоне частот. Установите в программе *VNAKit.exe* полный диапазон частот 100 МГц...6000 МГц, уровень мощности -10 дБ, полосу пропускания приемника 10 кГц, максимальное количество частотных точек 1001, двухпортовый режим **Dual Port**, активный порт – Port A. Укажите путь к файлам данных (**File=> Settings=>Path for result files**), тип файла – текстовый *.csv*.

Подключите между портами А и В исследуемый ППФ фильтр и включите режим измерения **Run**. Запустите программу *UVNA-63A.exe* и загрузите в нее файл измерений. Просмотрите полученные из этого файла результаты для модулей S_{11} и S_{21} . Выберите начальную и конечную частоту обзора так, чтобы получить АЧХ полосового фильтра в удобном масштабе по частоте. Например, это могут быть граничные частоты по уровню -35...-45 дБ.

В программе *VNAKit.exe* установите новые граничные частоты и проведите измерение АЧХ в новом частотном диапазоне.

Проведите калибровку в новом диапазоне по КЗ и «на проход» по методике, изложенной в предыдущем пункте. Загрузите полученные файлы калибровок по уровню в программу *UVNA-63.exe* и просмотрите их графики. Переключите программу на просмотр скорректированных данных (режим **Коррекция**).

Измерьте разницу между некалиброванными и калиброванными зависимостями коэффициента передачи в полосе прозрачности фильтра. Для этого в выпадающем меню графика S_{21} отключите автомасштабирование по оси Y и вручную установите крупный масштаб по уровню АЧХ. Для измерения используйте курсоры графика, перемещаемые мышью.

Включите автомасштаб и измерьте параметры полосового фильтра: полосы пропускания по уровням $A_1 = -3$ дБ и $A_2 = -20$ дБ, неравномерность АЧХ $|S_{21}|$ в полосе пропускания. Сравните полученные данные с графиками рис. 11.15. Рассчитайте коэффициент прямоугольности фильтра.

По графику $|S_{11}|$ определите максимальный и минимальный коэффициент отражения на границах полосы пропускания. Рассчитайте КСВН на входе фильтра в этих точках.

Сделайте копию полученных графиков и данных скорректированных АЧХ $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$. Для этого используйте пункты выпадающего меню **Export Simplified** и **Image Export => Export Data to Excel**. Постройте в Excel графики полученных зависимостей. 

Часть 2: Однопортовая калибровка измерительного тракта и измерение коэффициента отражения кольцевого микрополоскового резонатора

11.6.3. Калибровка и измерение коэффициента S_{11} резонатора

Включите компьютер, зайдите в папку *UVNA_SIP* на рабочем столе и запустите интерпретатор языка Python, двойным щелчком по файлу программы расчета однопортовых СВЧ устройств *UVNA_SIP.py*. Программа запустится с параметрами, которые были сохранены в предыдущем сеансе работы в текстовом файле *UVNA_SIP.state*.

Введите полный частотный диапазон расчета 100 МГц ... 6000МГц и запомните введенные параметры (кнопка **Accept state**). Запустите программу расчета (кнопка **Run**). На вопрос о калибровке ответьте «**Нет**». Подключите к кабелю, идущему от направленных ответвителей активного порта 3 (порт А) исследуемый кольцевой резонатор (DUT). На второй порт резонатора должна быть установлена согласованная нагрузка.

Выполните измерение S_{11} в полном частотном диапазоне. Сохраните график для отчета (правая кнопка внизу окна графика). 

На графике $|S_{11}|$ с помощью курсора мыши найдите границы частотного диапазона первого резонанса (значение частоты курсора выводится внизу графика-координата X). Установите начальную и конечную частоты измерения для этого диапазона и запомните введенные параметры (кнопка **Accept state**). Запустите процедуру измерения (кнопка **Run**) и, тем самым, проведите полную однопортовую калибровку измерительного тракта. Для этого, следуя указаниям в диалоговом окне программы, последовательно подключайте эталонные нагрузки **XX**, **K3** и согласованную нагрузку (**Open, Short, Load**). Затем подключите исследуемый резонатор и произведите измерение частотных характеристик для некалиброванного (S_{11}) и калиброванного ($S_{11 \text{ согт}}$) измерительного трактов.

С помощью курсора определите погрешность некалиброванных АЧХ в точке минимума (в резонансе), а также значение резонансной частоты. Численные данные измерения сохраняются при каждом запуске программы в текстовых файлах формата Touchstone с именами *UVNA_uncal.S1P* и *UVNA_cal.S1P*. Файлы данных по умолчанию хранятся в каталоге “.\data”, там же хранится обновляемый файл графика. Для сохранения данных переименуйте файлы, сохраняя расширение *.s1p* (например *Uncal1.s1p*, *Cal1.s1p*, *Graph1.png*) и скопируйте эти файлы на флеш-накопитель. 

11.6.4. Компьютерное моделирование резонатора и сравнение результатов с данными эксперимента

В программе лабораторной работы предусмотрено электродинамическое моделирование кольцевого резонатора (с использованием планарных моделей полосковых элементов EMSight) в среде компьютерного проектирования Microwave Office (MWO 10). Файл проекта моделирования называется *UVNA_S1_Ring.emp*. Он расположен в каталоге данных “.\data”. В проекте представлена готовая **EM structure** резонатора, размеры и свойства полосковых элементов модели соответствуют исследуемому резонатору и не требуют корректировки.

Задачи расчетной части работы таковы:

1. В проект моделирования введите в раздел **Data Files** данные измерений из заранее подготовленного файла *UVNA_cal.S1P*.
2. Проведите расчет коэффициента S_{11} резонатора в частотном диапазоне 1.5 ... 2.5 ГГц, число частотных точек 201.
3. Построить расчетные и экспериментальные частотные характеристики $|S_{11}|$ на одном графике, используя две оси ординат.
4. Построить расчетные и экспериментальные фазочастотные характеристики S_{11} на одном графике в формате непрерывной фазы AngleU.
5. Отдельно постройте график комплексных коэффициентов отражения на диаграмме Смита.
6. Полученные графики сохранить и поместить в отчет по лабораторной работе.

Часть 3: Двухпортовая калибровка тракта и измерение матрицы рассеяния микрополоскового циркулятора

11.6.5. Калибровка и измерение коэффициента S_{11} резонатора

Включите компьютер, зайдите в папку *UVNA_S2P* на рабочем столе и запустите интерпретатор языка Python, выбрав файл программы расчета двухпортовых СВЧ устройств *UVNA_S2P.py*. Программа запустится с параметрами, которые были сохранены в предыдущем сеансе работы в текстовом файле *UVNA_S2P.state*.

Введите полный частотный диапазон расчета 100 МГц ... 6000 МГц и запомните введенные параметры (кнопка **Accept state**). Запустите программу расчета (кнопка **Run**). На вопрос о калибровке ответьте «**Нет**». Подключите к соединительным кабелям, идущим от направленных ответвителей активных портов А и В исследуемый циркулятор так, чтобы порт А трансмиттера соединялся с портом P1, а порт В – с портом P2 циркулятора. На порт P3 циркулятора должна быть установлена согласованная нагрузка.

Выполните измерение модулей элементов матрицы рассеяния циркулятора в полном частотном диапазоне (кнопка **Run**). На вопрос о калибровке ответьте «**Нет**». Сохраните график для отчета (правая кнопка внизу окна

графика). 

На графике $|S_{12}|$ с помощью курсора мыши найдите границы частотного диапазона, в пределах которого обратный коэффициент передачи не превышает (-10) дБ (значение частоты курсора выводится внизу графика-координата X). Установите в программе *UVNA_S2P* начальную и конечную частоты расчета для этого диапазона и запомните введенные параметры (кнопка **Accept state**). Затем проведите двухпортовую калибровку измерительного тракта.

Для этого запустите программу расчета кнопкой **Run** и, следуя указаниям в диалоговом окне программы, последовательно подключайте к кабелям

портов А и В соединитель «на проход» (**Through**), эталонные элементы XX, КЗ и согласованную нагрузку (**Thru, Open, Short, Load**). Затем подключите циркулятор и произведите измерение частотных характеристик рассеяния для некалиброванного (S_{xx}) и калиброванного ($S_{xx\text{ corr}}$) измерительного трактов, а также их отношений в дБ (в диалоговом окне вывода графиков отношения надо ответить «ДА»).

С помощью курсора определите центральную рабочую частоту циркулятора по минимуму $|S_{12\text{ corr}}|$ и уровень вносимого ослабления циркулятора на этой частоте. Оцените рабочий диапазон частот циркулятора по уровню (-20) дБ. Запишите нижнюю, центральную и верхнюю частоты рабочего диапазона циркулятора. Определите по графикам максимальную погрешность измерительного тракта в рабочем диапазоне частот для $|S_{12}/S_{12\text{ corr}}|$ и $|S_{21}/S_{21\text{ corr}}|$.

Дальнейшую обработку результатов целесообразно вести в среде Microwave Office. Файл проекта для обработки данных измерений называется *UVNA_S2_Circulator.emp*. Он расположен в каталоге данных “.data”. Численные данные расчета сохраняются автоматически после каждого запуска программы в текстовых файлах формата Touchstone с именами *UVNA_uncal.S2P* и *UVNA_cal.S2P*. Файлы по умолчанию хранятся в каталоге “.data”, там же хранится обновляемый файл последнего графика. Для сохранения данных последнего запуска программы переименуйте файлы (сохраняя расширение (например *Uncal1.s2p*, *Cal1.s2p*, *Graph2.png*) и скопируйте эти

файлы на флеш-накопитель. 

Задачи расчетной части работы таковы:

1. Запустите программу *UVNA_S2P_Circulator.emp*. Загрузите в нее файл данных *UVNA_cal.S2P*. Постройте частотные характеристики $|S_{21}|$ и $|S_{12}|$ на одном графике, используя две оси ординат.

2. Найдите потери ($|S_{21\text{corr}}|$) и ослабление ($|S_{12\text{corr}}|$) на нижней, центральной и верхней частотах рабочего диапазона циркулятора. Результаты сведите в таблицу по форме 1.

3. Постройте графики коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$, а также КСВН₁₁ и КСВН₂₂ (формат VSVR(1) и VSVR(2)). Измерьте значения коэффициентов отражения и КСВН в трех точках рабочего диапазона. Результаты поместите в таблицу по форме 1.

4. Постройте АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи циркулятора на одном графике, используя две оси ординат.

5. Полученные графики сохраните и поместите в отчет по лабораторной работе.

Форма 1

$f_n = \dots$ МГц	$f_{cp} = \dots$ МГц	$f_b = \dots$ МГц
$ S_{12\text{corr}} $, дБ		
$ S_{21\text{corr}} $, дБ		
$ S_{11\text{corr}} $, дБ, КСВН		
$ S_{22\text{corr}} $, дБ, КСВН		

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки;
- таблицы с результатами измерений параметров исследованных СВЧ устройств в сравнении с паспортными параметрами;
- скриншоты и графики измеренных частотных зависимостей, построенные из .csv и Touchstone файлов.

Контрольные вопросы

1. Какой метод измерения положен в основу анализаторов цепей СВЧ? Какие элементы измерительного тракта этих приборов необходимы для данного метода?
2. Чем отличаются скалярные и векторные анализаторы цепей СВЧ? Почему при измерении модулей коэффициентов матрицы рассеяния точность у векторных анализаторов (при прочих равных условиях) выше?
3. Чем отличается измеритель отражения/передачи СВЧ от автоматизированного анализатора цепей? В чем его достоинство и недостаток?
4. Какие причины появления систематических и случайных погрешностей в анализаторах цепей СВЧ?
5. Какие систематические погрешности измерительного тракта рефлектометра устраняют при его калибровке?
6. Какие систематические погрешности измерительного тракта для коэффициента передачи устраняют при его калибровке?
7. Что такое скалярная калибровка измерительного тракта анализатора цепей СВЧ?
8. Как производят калибровку по фазе при измерении коэффициентов отражения/передачи?
9. Как проводят однопортовую калибровку анализатора цепей?
10. Что такое полная (SOLT) калибровка анализатора цепей СВЧ? Какие эталонные нагрузки при этом используют?
11. Как калибруют анализатор цепей для исключения просачивания сигнала (калибровка изоляции)?
12. Поясните схему комплекта анализатора цепей СВЧ UVNA-63. Почему для направленных ответвителей падающей и отраженной (проходящей) волн выбраны разные переходные ослабления?
13. Как использовать анализатор цепей UVNA-63 для измерения многопортовых устройств СВЧ?
14. Что такое «активный порт» анализатора цепей UVNA-63? Для чего его переключают в автоматизированном приборе?
15. Пояснить направленный граф погрешностей рефлектометра и измерителя коэффициента передачи.

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие /Под. ред. А.А.Данилина - СПб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
4. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
5. Дансмор Джоэль П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018.-736с.
6. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 500с.

Отформатировано: Отступ: Слева: -0.5 см, Выступ: 0.5 см

отформатировано: русский

отформатировано: русский

Оглавление

11. Калибровка анализатора цепей СВЧ UVNA-63	2
11.1. Общие сведения об анализаторах цепей СВЧ	2
11.2. Калибровка векторных анализаторов цепей СВЧ	5
11.3. Обучающий модульный комплект векторного анализатора цепей СВЧ фирмы Mini – Circuits UVNA-63	12
11.4. Состав лабораторной установки	16
11.5. Вывод данных измерения в формате Touchstone	17
11.6. Задание и указания к выполнению работы	19
11.6.1. Измерение АЧХ фильтра низкой частоты VLF-1500+ в полном частотном диапазоне	19
11.6.2. Измерение АЧХ ППФ VBF-2435+	22
11.6.3. Калибровка и измерение коэффициента S_{11} резонатора	24
11.6.4. Компьютерное моделирование резонатора и сравнение результатов с данными эксперимента	25
11.6.5. Калибровка и измерение коэффициента S_{11} резонатора	26
Содержание отчета	28
Контрольные вопросы	29
Литература	30