



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)

Векторный анализатор СВЧ цепей Agilent E5062A

Санкт-Петербург
2025 г.

1. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ЦЕПЕЙ AGILENT E5062A

В данной лабораторной работе изучаются устройство и принцип действия измерителя параметров СВЧ цепей E5062A компании Agilent Technologies (в настоящее время Keysight Technologies). Анализаторы цепей серии E5062A обладают базовыми функциональными возможностями по анализу цепей для широкого круга применений в различных отраслях, таких как беспроводные средства связи, кабельное ТВ, автомобильная промышленность, образование и многое другое. Приборы данной серии имеют все необходимые параметры и функции для исследования и разработок и испытаний СВЧ устройств, таких как фильтры, усилители, антенны, кабели и распределительные устройства кабельного ТВ.

1.1. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используется векторный анализатор цепей Agilent E5062A, позволяющий одновременно получить частотные зависимости модулей и аргументов коэффициентов S_{11} и S_{21} исследуемого объекта и другие параметры. Структурная схема анализатора представлена на рис. 1.1. Схема включает встроенный измерительный тракт СВЧ, состоящий из перестраиваемого генератора, аттенюатора, направленных ответвителей, измерителя отношений, реализованного в виде радиоприёмника с тройным переносом, АЦП и цифровой схемы обработки сигналов. Исследуемые устройства подключаются к портам 1 (активный) и 2 (пассивный).

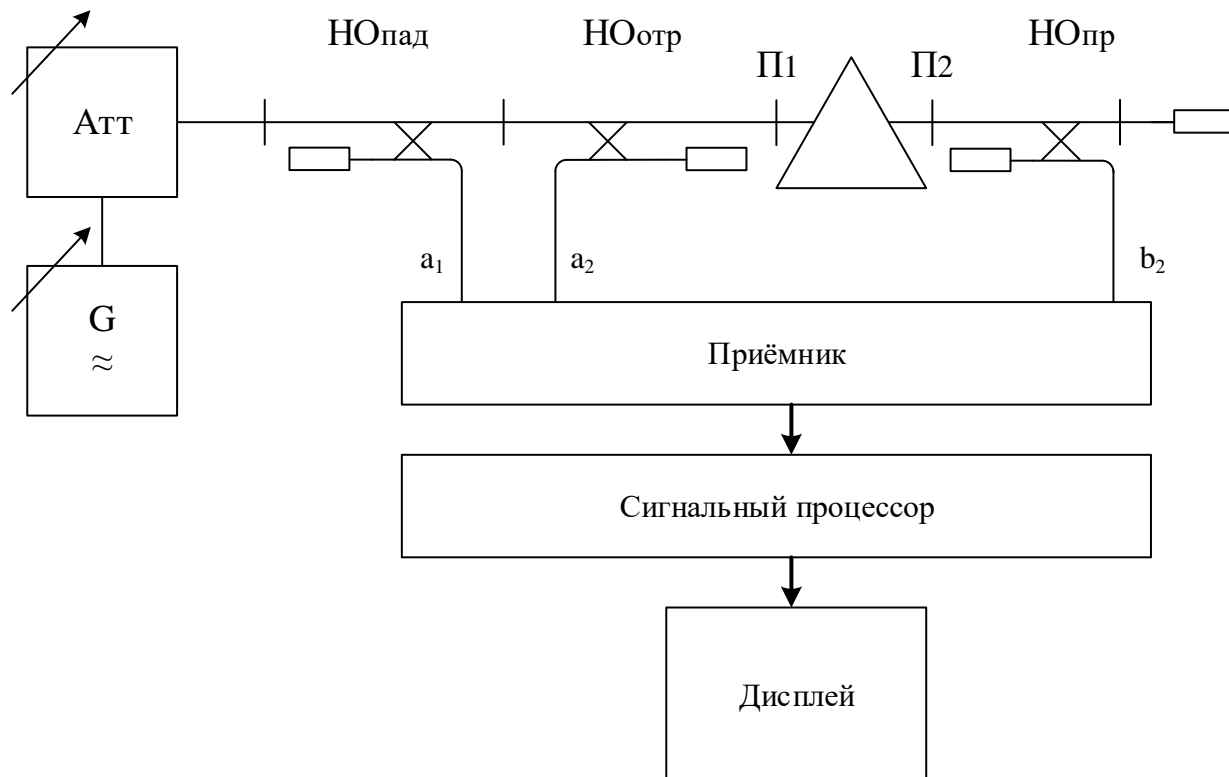


Рисунок 1.1 Структурная схема векторного анализатора цепей.

При измерении параметров четырехполюсника используют следующие возможности работы прибора:

1. Калибровка прибора в полном частотном диапазоне.
2. Определение частотного диапазона измерения параметров конкретного фильтра и установка удобного масштаба по оси частот и уровню АЧХ.
3. Измерение АЧХ коэффициентов S_{11} и S_{21} в полном масштабе по уровню.
4. Использование режима электронных меток для определения параметров четырехполюсника.
5. Измерение АЧХ в полосе пропускания (или заграждения) в крупном масштабе.
6. Сохранение полученных результатов в текстовом файле для дальнейшего использования в среде Excel.

В лабораторной работе исследуются объемные резонаторы двух видов, фильтр ПЧ, либо ФНЧ (по указанию преподавателя).

Для соединения прибора с нагрузками и четырехполюсниками используются соединительные кабели N-male – N-male и переходник N-female – N-female.

1.2. Задание и указания к выполнению лабораторной работы

В работе выполняется калибровка прибора E5062A и измерение частотных характеристик объемного резонатора, полосно-пропускающего фильтра (ППФ) и фильтра нижних частот (ФНЧ) (по указанию преподавателя). Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить руководство пользователя прибора E5062A (РП), включающее в себя методику его использования и подробное описание принципов работы. Для выполнения задания потребуется USB-накопитель, отформатированный в формате FAT, FAT32 или NTFS. Накопитель с файловой системой ExFAT не поддерживается операционной системой Windows 2000.

1.2.1. Калибровка и подготовка прибора к работе

Подготовка прибора к работе.

1. Включите анализатор цепей E5062 и дождитесь загрузки программного обеспечения.
2. Установите начальный режим работы прибора клавишами **Preset => OK**.
3. Установите полный рабочий диапазон 300 кГц ... 3ГГц. Это можно сделать разными способами, например, указав ручную начальную и конечную частоту работы прибора (раздел меню **Stimulus**, или кнопки **Start, Stop**). Используйте п. 1.3.3 РП. Текущий рабочий диапазон отображается в строке состояния либо через значения Start, Stop, либо через Center, Span.

Калибровка прибора E5062A. Подробное описание режимов калибровки можно найти в п. 1.5 РП.

4. Произведите расширенную калибровку (**Enhanced Response**).

Калибровка источника сигнала для исключения погрешностей, связанных с неидеальной направленностью (E_d) производится для активного порта

прибора (Port 1) строго на конце измерительного коаксиального кабеля, при помощи которого будет производиться измерение. Калибровка для исключения погрешностей, связанных с неравномерностью ЧХ канала (E_r) производится путем соединения вместе измерительных кабелей активного (Port 1) и пассивного (Port 2) каналов при помощи соединительного переходника F-F (Female-Female).

5. Результаты калибровки можно проконтролировать, включая и выключая коррекцию: **Calibration - Correction - On (Off)**. По окончании проверки оставьте коррекцию включенной (**On**).

После окончания калибровки запрещается отключать, либо заменять измерительные кабели.


6. Сохраните состояние прибора с результатами калибровки в файл D:\Student\State<номер группы>, согласно п. 1.9 РП. Используйте кнопку **File Dialog** для задания собственного имени файла. Впоследствии можно быстро загрузить исходное состояние прибора используя этот файл. Не используйте чужие файлы, так как состояние калибровки в них неизбежно будет отличаться.

1.2.2. Исследование различных режимов отображения графиков

В данном разделе исследуются режимы отображения графиков с различными измеряемыми величинами, а также использование маркеров для задания рабочей полосы частот. В качестве исследуемых устройств используются 1-2 образца по указанию преподавателя.

1. Для наблюдения частотной характеристики исследуемого устройства включите его на проход между портом 1 и портом 2.
2. Установите в качестве измеряемой величины ослабления (S_{21}) в логарифмическом масштабе согласно инструкциям п. 1.4 РП.
3. Установите удобный масштаб по вертикали в режиме автоподстройки, для чего необходимо нажать **Scale** => **Auto Scale**.
4. Для резонатора на графике S_{21} будет наблюдаться несколько пиков резонатора. Необходимо исследовать первый, главный пик (резонанс).
5. Для полосового фильтра будет наблюдаться единственный максимум. Его и нужно исследовать.
6. Установка рабочего диапазона частот в районе исследуемого пика. Включите отображение маркера нажатием кнопки **Marker** => **Marker 1**. Установите маркер в точку максимума исследуемого пика при помощи кнопки **Marker Search** => **Peak**, перемещая его между пиками нажатием кнопок **Peak Left** и **Peak Right**.
7. Нажмите на кнопку **Marker Fcnt** => **Marker** → **Center**. Это переместит пик в центр экрана.
8. Для более точного позиционирования резонансного пика в центре экрана повторите пункты 5 и 6. Это может понадобиться в случае уменьшения полосы обзора.
9. Далее, используя мышь, либо колесо передней панели установите полосу обзора, соответствующую полосе резонатора по уровню -30дБ, либо -20 дБ для полосового фильтра. Используйте инструкцию по установке частот с помощью маркера в п. 1.3.3 РП.

10. Инвертируйте отображение графиков (**Display => Invert Color - On**) для экономии краски принтера.

11. Сохраните снимок окна графика S_{21} в графический файл на внешнем USB – диске (**System => Dump Screen Image**), п. 1.8 РП. 

12. Установите число отображаемых графиков (**Display => Num of Traces**) равным 4, формат вывода графиков на экран дисплея – x4 (**Display => Allocate Traces** => выбрать из списка необходимый способ отображения) (рис. 1.2).

Не нажимайте кнопки *Allocate Traces* и *Num of Traces*.

Для переключения между графиками можно воспользоваться клавишами на лицевой панели прибора **Trace Next** (следующий график), **Trace Prev** (предыдущий график), кнопками экранного меню или щелчком мыши на окне требуемого графика. Двойной щелчок разворачивает выбранный график на весь экран и сворачивает его обратно.

13. Выведите в четырех окнах разные виды графиков, так, чтобы внешний вид окна программы соответствовал рис. 1.3 для резонатора и рис. 1.4 для полосового фильтра. Используйте пп. 1.4.1 и 1.4.2 РП.

Для резонатора расположите графики в следующем порядке:

- S_{21} в логарифмическом масштабе.
- S_{11} в логарифмическом масштабе.
- КСВН (**SWR**) по S_{11} .
- Диаграмма Смита по S_{11} (**Smith - Log/Phase**).

Для полосового фильтра:

- S_{21} в логарифмическом масштабе.
- S_{11} в логарифмическом масштабе.
- КСВН (**SWR**) по S_{11} в масштабе 10 dB/div.
- Дополненная фаза по S_{21} (**Expand Phase**) в масштабе 180 °/div.



Рис. 1.2. Варианты расположения графиков

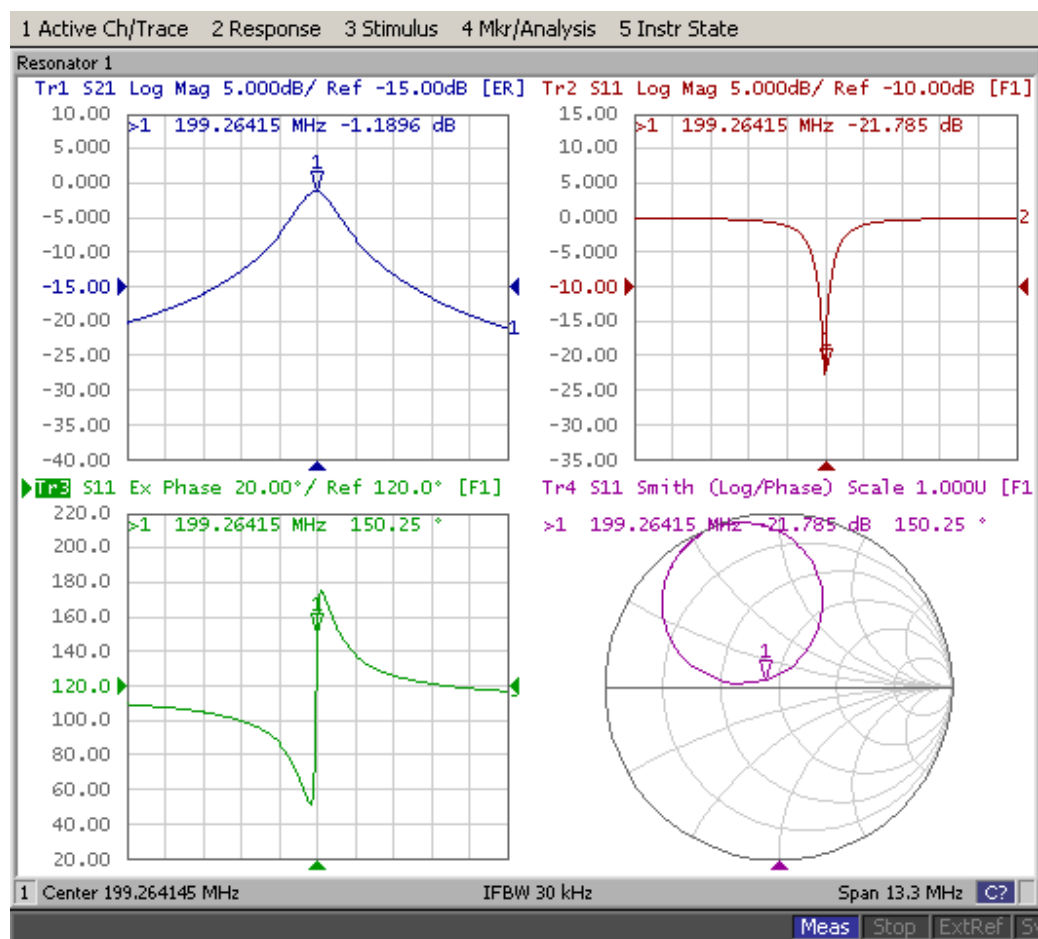


Рис. 1.3. Расположение графиков для резонатора

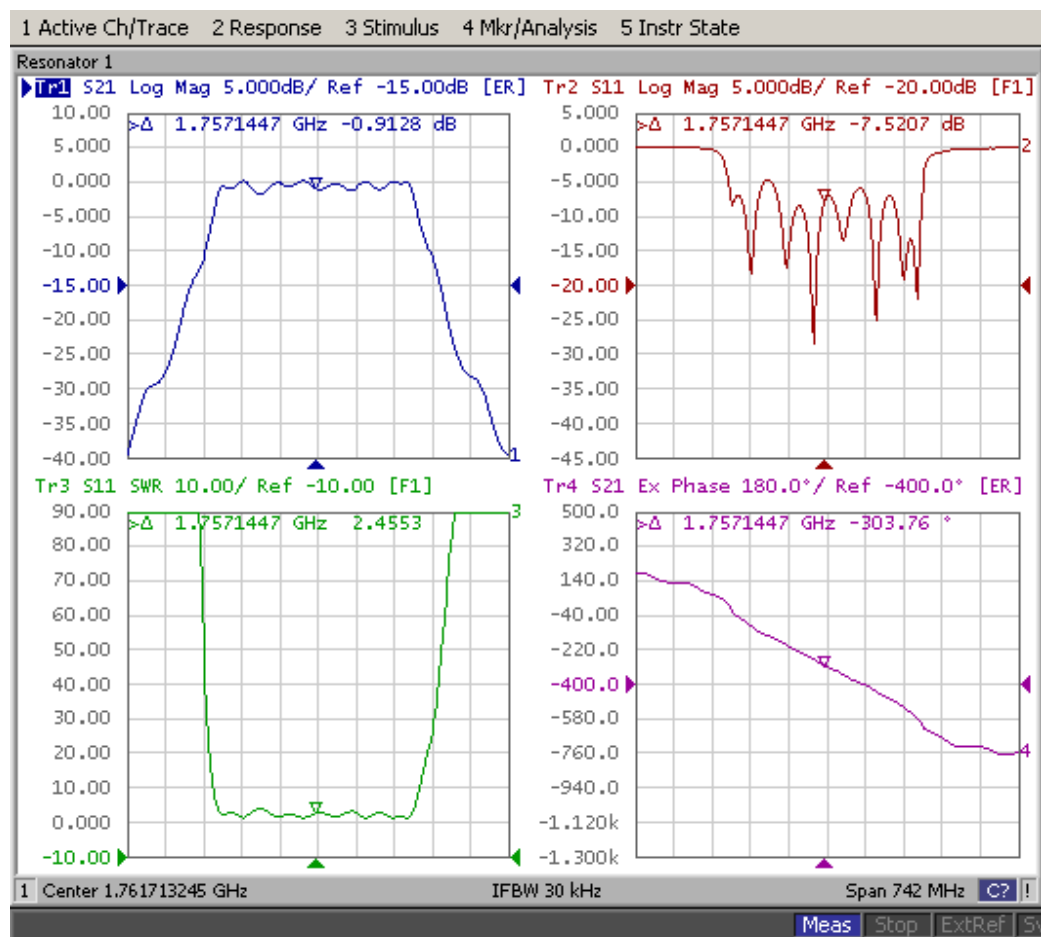


Рис. 1.4. Расположение графиков для полосового фильтра

14. Установите удобный масштаб по вертикали для всех графиков. Можно использовать режима автоподстройки согласно п. 1.4.3 РП для всех графиков, кроме диаграммы Смита. Для графика КСВН следите, чтобы масштаб **Scale/Div** всегда равнялся 1.000 U/FS. Если автоматический масштаб приводит к некорректному отображению, то укажите масштаб **Scale/Div** вручную. Это особенно актуально для графиков КСВ и ФЧХ. Для сдвига графика по вертикали можно вручную задать опорный уровень сигнала (**Reference Value**). Это позволяет задавать точку на шкале ординат, попадающую в начало шкалы.

15. Сохраните снимок экрана с четырьмя графиками.



1.2.3. Исследование режимов измерений

1. Выключите все маркеры (**Marker** => **Clear Marker Menu** => **All OFF**), если таковые имеются.
2. Выделите график S_{21} и разверните его на весь экран.
3. На графике S_{21} включите и поместите опорный маркер (**Ref Marker**) в максимум АЧХ (**Marker** => **Search** => **Max**). Для полосового фильтра, возможно, потребуется вручную скорректировать положение маркера для попадания точно в центр полосы пропускания. Для этого можно перетаскивать значок маркера мышью, или воспользоваться колесом.
4. Активируйте маркеры 1 и 2 и поместите их вручную на 3 дБ ниже и выше максимума АЧХ, раздел 1.6 РП. Отсчитайте рабочую полосу резонатора по уровню -3 дБ. Данные по 1 и 2 маркеру должны отображаться относительно опорного. Запишите полученные численные данные в таблицу 1. Рассчитайте и запишите абсолютные значения для относительных параметров.


Обратите внимание, что значки маркеров будут отображаться и перемещаться синхронно на всех графиках, что позволяет наглядно наблюдать за взаимосвязь положения точек АЧХ и диаграммы Смита.

Таблица 1.

Исследуемый образец: _____

	Измерение вручную			Автоматическое измерение	
	F, МГц	$ \Delta A $, дБм	$ A $, дБм	F, МГц	$ A $, дБм
Частота левого среза					
Центральная Частота					
Частота правого среза					
Полоса пропускания -3дБ		_____	_____		_____

5. Сбросьте все маркеры (**Marker => Clear Marker Menu => All OFF**). Заново поставьте маркер в максимум АЧХ. Включите режим автоматического измерения полосы пропускания (**Marker-Search => Bandwidth => On**) по уровню -3 дБ. Запишите измеренные данные (центральная/резонансная частота, полоса пропускания, частоты среза, вносимое затухание) в таблицу 1.

6. Разверните график АЧХ на весь экран. Сохраните снимок экрана в графический файл (**System => Dump Screen Image**) и численные данные АЧХ (**Save/Recall => Save Trace Data**). 

Затем перейдите на график ФЧХ и повторите сохранение снимок экрана и численных данных. 

Обратите внимание на то, что численные данные сохраняются в файл только одного графика. Для сохранения данных нескольких графиков нужно последовательно переключаться между ними и сохранять данные в разные файлы.

7. Проверьте влияние калибровки на диаграмму Смита. Выключите коррекцию калибровки (**Calibrate => Correction = Off**) и запишите полученную диаграмму в память (**Display => Data→Mem**). Затем включите коррекцию и выведите на экран две диаграммы - при включенной и выключенной калибровке (**Display => Data & Mem**). Результат зафиксируйте в виде скриншота.

8. Отключите отображение запомненных графиков (**Display => Data**).

1.2.4. Режим измерения параметров СВЧ фильтра нижних частот (ФНЧ).

По указанию преподавателя.

1. Используя п. 1.9 РП загрузите начальное состояние прибора, сохраненное в п. 1.2.1.
2. Установите в измерительный тракт прибора фильтр низких частот (ФНЧ). Проведите анализ его АЧХ (S_{21}) в максимальной полосе качания.
3. Определите рабочую область частот фильтра и установите полосу обзора в соответствии с ней: **Start** на 100 МГц ниже частоты среза, **Stop** по уровню -20 дБ.
4. Постройте частотные характеристики модуля S_{21} в логарифмическом масштабе и данные КСВН. Установите удобный для обзора масштаб по вертикали **Scale** => **Scale/Div**.
5. Используйте маркерный режим определения параметров радиофильтра **Marker Fctn** => **RF Filter Stats** (см. п. 1.68 РП). В этом режиме на экране появляются 4 маркера, которые необходимо вручную последовательно установить на графике в характерные точки АЧХ фильтра. Запишите полученные данные фильтра.
4. Сохраните скриншот графика АЧХ и КСВН (**System** => **Dump Screen Image**) и численные данные АЧХ и КСВН (**Save/Recall** => **Save Trace Data**).



1.3. Обработка данных измерения

К сожалению, в приборе E5062A вывести файл данных в формате, совместимом с Excel не удастся. Поэтому приходится использовать расширенные функции импорта данных из файла .CSV.

Для обработки данных можно использовать Microsoft Excel. Примерная схема импорта данных следующая:

1. Создайте новый документ Microsoft Excel.
2. Если используется Excel версии 2019, то необходимо предварительно зайти в настройки программы: **Файл** => **Параметры**. На вкладке **Данные** в

разделе **Отображение мастеров импорта данных прежних версий** поставить галочку **Из текста (прежних версий)**.

3. Установите курсор таблицы на первую строку.

4. Используйте команду импорта текстовых данных Excel.

Для версии 2019: **Данные => Получить данные => Устаревшие мастера => Из текста (прежних версий)**. Либо набрать в строке поиска «**Получить данные из текста**».

Для версии 2016: **Данные => Из текста => Импортировать данные**.

Для других версий: **Данные => Получение внешних данных => из текста** либо **Данные => Импорт внешних данных => Импортировать данные**.

Импортируйте файл. Режим импорта – с разделителем, импорт с 3-й строки, разделитель – запятая, формат данных *всех* столбцов – текстовый, разделитель целой и дробной части (в разделе **Подробнее**) – точка («.»). Нажмите кнопку **Готово**.

8. В таком виде файл готов к обработке.

9. При обработке будет полезно создать новый столбец «Частота», в котором значения исходной частоты будут поделены на 1 000 000. Это позволит выразить шкалу в МГц.

10. Постройке требуемый график. При необходимости используйте не все данные, а только те, что представляют интерес для исследования. Скорректируйте формат отображения числовых подписей осей и максимальные значения осей.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- Протокол измерений.
 - Схема измерительного тракта в режиме однопортовой калибровки и калибровки на проход.
 - Схема измерительного тракта в режиме измерения параметров четырехполюсника.
 - АЧХ полосового фильтра/резонатора в полной полосе частот, построенная по численным данным и снимок экрана прибора.
 - Снимок экрана в режиме измерения исследуемого пика АЧХ полосового фильтра/резонатора в узкой полосе частот с 4 графиками. Графики, построенные по численным данным в данном режиме.
 - Данные измерения полосы пропускания полосового фильтра/резонатора, полученные при помощи маркеров в ручном и автоматическом режиме. Сравнение данных в графической форме.
 - Снимки экрана в режиме с отключенной и включенной коррекцией.
- Выводы относительно влияния калибровки на полученный результат.
- Результаты измерения параметров радиофильтров для фильтра НЧ, снимки экрана и графики измеренных зависимостей, построенные в Excel (S_{21} , KCBH).

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые анализатором цепей СВЧ.
2. Какие особенности имеет измерение параметров цепей в СВЧ диапазоне по сравнению с измерением АЧХ и ФЧХ на НЧ и ВЧ??
3. Для чего в анализаторах цепей СВЧ используют преобразование частоты?
4. Поясните структурную схему анализатора E5062A. Укажите назначение основных блоков прибора и элементов измерительного тракта.
5. Что такое «калибровка» векторного анализатора цепей СВЧ? Какие погрешности с ее помощью можно устранить?
6. Опишите методику однопортовой калибровки анализатора цепей. Какие эталонные нагрузки используют для нее?
7. Что такое «расширенная калибровка SOLT»? Какие эталонные нагрузки для неё используются? Как проводят калибровку изоляции (перекрестные помехи)?
8. Что такое «полная двухпортовая калибровка» анализатора? Чем она отличается от однопортовой калибровки?
9. Какими способами можно устанавливать частотный диапазон измерения в анализаторе E5062?
10. В чем заключаются отличия векторного анализатора цепей от спектроанализатора, используемого со следящим генератором для измерения параметров СВЧ устройств? Какие измерения, присущие векторному анализатору, можно произвести при помощи спектроанализатора и наоборот?
11. Какие форматы графиков данных измерения предусмотрены в приборе E5062?
12. Для чего используют несколько форматов вывода фазочастотных характеристик? Что такое групповое время запаздывания (ГВЗ)? Как параметр ГВЗ связан с фазочастотными характеристиками?
13. Какой режим прибора используют для определения параметров ППФ и ПЗФ? Какие параметры фильтра в этом режиме измеряют?
14. Какой специализированный режим измерения параметров ФНЧ (радиофильтра) предусмотрен в программном обеспечении прибора E5062?
15. Какие однопортовые СВЧ устройства (нагрузки) Вы знаете? Каким КСВ они обладают и где их следует отмечать на диаграмме Смита?

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. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Микроволновая электроника: Учебник/ Под ред. А.Д. Григорьева. - СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 496с
5. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
6. Дансмор Джоэль П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018.-736с.
7. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 500с.

Оглавление

1. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ЦЕПЕЙ AGILENT E5062A	2
1.1. Описание лабораторной установки	2
1.2. Задание и указания к выполнению лабораторной работы	4
1.2.1. Калибровка и подготовка прибора к работе	4
1.2.2. Исследование различных режимов отображения графиков	6
1.2.3. Исследование режимов измерений	10
1.2.4. Режим измерения параметров СВЧ фильтра нижних частот (ФНЧ).	12
1.3. Обработка данных измерения	12
Содержание отчета	14
Контрольные вопросы	15
Литература	16