

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

А.А. ДАНИЛИН

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Микроволновая техника ”

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Санкт-Петербург

2014

В лабораторной работе студенты знакомятся с фильтрами СВЧ различного назначения, реализованных в микрополосковом варианте. Изучаются общие методы их проектирования и методы измерения параметров с помощью автоматизированного анализатора СВЧ цепей Agilent E5062A.

1. Общие сведения об фильтрах СВЧ

Фильтры СВЧ применяются для частотной селекции сигналов в диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Особенностью фильтров СВЧ является их реализация в виде распределенных линейных структур. Этим они отличаются от обычных электрических фильтров, в которых используются сосредоточенные LC-элементы. Под фильтром СВЧ обычно понимают линейное устройство, характеризующееся частотной зависимостью вносимого ослабления (затухания) $A, \text{дБ} = L, \text{дБ} = -20 \lg(|S_{21}|)$ в СВЧ тракте. Если сопротивления генератора и нагрузки, между которыми включают фильтр, разные, то его принято называть *согласующим устройством*.

Область частот с малым ослаблением принято называть полосой пропускания (bandpass), область с большим ослаблением – полосой заграждения (bandstop). По взаимному расположению этих полос принято различать следующие типы фильтров (рис.1):

- Фильтры *нижних частот* (ФНЧ, Lowpass Filters -LPF) ;
- Фильтры *верхних частот* (ФВЧ, Highpass Filters -HPF) ;
- *Полосно-пропускающие* фильтры (ППФ, Band pass Filters -BPF) ;

- Полосно-заграждающие (режекторные) фильтры (ПЗФ, Bandstop Filters - BSF) .

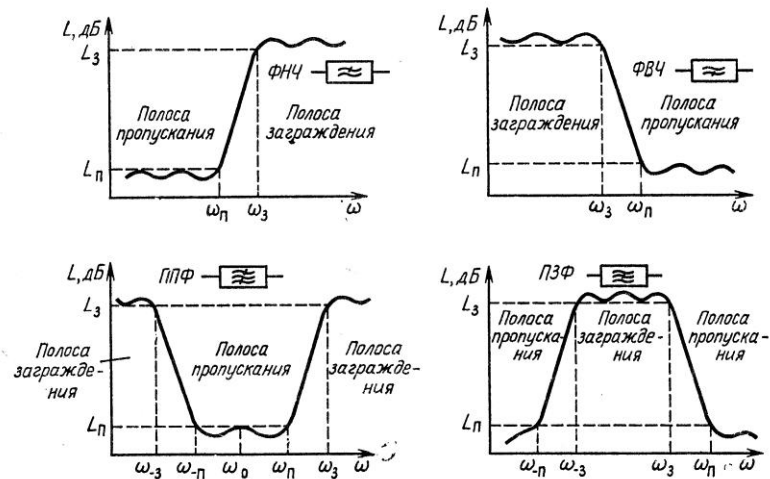


Рис.1. Типы частотных характеристик фильтров СВЧ

Для уменьшения потерь сигнала фильтры выполняют, как правило, из реактивных элементов. Поэтому увеличение вносимого ослабления вне полосы пропускания обеспечивается за счет отражения СВЧ сигнала от входа фильтра.

При проектировании фильтров обычно задают среднюю частоту и ширину рабочей полосы частот (Bandwidth) для заданного уровня потерь. Например, полоса пропускания для ППФ по умолчанию устанавливается на уровне 3 дБ (Passband – BW3dB), а полоса заграждения – по уровню 40 дБ (Stopband – BW40dB). Относительная ширина полосы (Percent Bandwidth) для ППФ и ПЗФ нормируется в процентах от значения центральной частоты, то есть от полусуммы значений граничных частот на уровне 3 дБ. Важными параметрами фильтра являются допустимое ослабление в полосе пропускания (Insertion Loss) и требуемое ослабление в полосе заграждения, уровень неравномерности (пульсации) коэффициента передачи либо в полосе прозрачности (Passband Ripple), либо в полосе заграждения (Stopband Ripple), либо в обеих полосах, измеряемый в децибелах; уровни согласования

фильтра по входу и выходу (коэффициент стоячей волны (Voltage Standing Wave Ratio – VSWR)).

В широкополосных системах большое значение имеет вид фазочастотной характеристики фильтра. Отклонение ее от линейной функции (Insertion Phase) в полосе пропускания может вызвать искажение формы сложных сигналов, проходящих через фильтр.

Фильтры СВЧ обычно строят как каскадное соединение простых элементов – резонаторов, шлейфов, отрезков линий передачи и пр. Частотные характеристики этих элементов достаточно сложны и затрудняют синтез фильтра по заданным параметрам. Поэтому проектирование фильтров СВЧ в большинстве случаев осуществляют *методом НЧ прототипов*. Он основан на представлении схемы замещения реального фильтра в виде лестничной LC-схемы ФНЧ, для которого реализована аппроксимация АЧХ в виде физически реализуемой функции передачи. Эта функция задается полиномами степени n , причем величина n соответствует числу элементов прототипа. Чем выше степень полинома, тем больше приближение АЧХ фильтра к идеальной (прямоугольной) форме.

Вид полинома определяет форму частотной характеристики. В СВЧ технике применяют несколько видов частотных характеристик фильтров, представленных в таблице 1. Наиболее распространенные виды характеристик - это максимально плоская АЧХ (Баттерворта) и равномерно-колебательная АЧХ (Чебышева) (рис. 3). В ряде случаев используют эллиптическую характеристику фильтра Кауэра, которая отличается повышенным ослаблением на отдельных частотах в полосе заграждения .

Характеристика вносимого затухания для фильтра Баттерворта задается полиномом

$$L(\Omega) = 10 \lg(1 + \gamma^2 \Omega^{2n}),$$

где Ω - частота, нормированная к заданной границе полосы пропускания (частоты среза фильтра ω_c) $\Omega = \omega / \omega_c$. Величина ослабления на частоте среза L_c определяется коэффициентом полинома γ

$$L_c = 10 \lg(1 + \gamma^2).$$

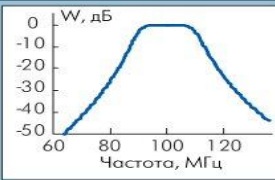
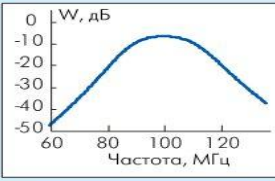
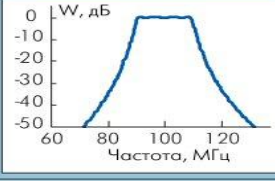
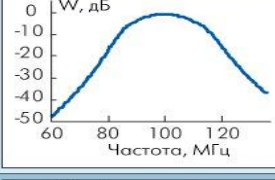
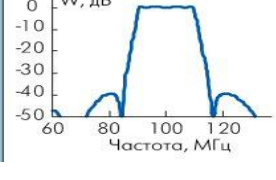
Таблица 1. Типы и характеристики частотных фильтров		
Тип фильтра	Особенности	Вид АЧХ*
Баттерворта	Монотонная и наиболее плоская АЧХ; монотонная ФЧХ во всей полосе частот при высокой избирательности; большая неравномерность ГВЗ	
Бесселя	Монотонная АЧХ при низкой избирательности; гладкая ФЧХ; наименьшее изменение ГВЗ в полосе пропускания	
Чебышева-1	Равноволновые пульсации АЧХ в полосе пропускания, монотонное изменение АЧХ в полосе заграждения; гладкая ФЧХ; значительная неравномерность ГВЗ	
Линейная ФЧХ	Гладкая АЧХ при невысокой избирательности; высокая линейность ФЧХ в полосе пропускания; небольшие пульсации ГВЗ	
Эллиптический (фильтр Кауэра, SELF)	Задаваемые уровни равноволновых пульсаций АЧХ в полосах пропускания и заграждения; значительные нелинейность ФЧХ и неравномерность ГВЗ	

Рис.2. Виды аппроксимации АЧХ фильтров

Фильтры с максимально плоской характеристикой используют в случае, когда требования к ослаблению в полосе заграждения не слишком велики, а к качеству фильтра в полосе пропускания (потери, равномерность

АЧХ и ФЧХ) – достаточно жесткие. Равноволновая характеристика Чебышева позволяет получить лучшее ослабление в полосе запираания и более крутой наклон АЧХ. Она описывается выражением

$$L(\Omega) = 10 \lg(1 + \gamma^2 T_n^2(\Omega)),$$

где $T_n(\Omega)$ – полином Чебышева n -ной степени:

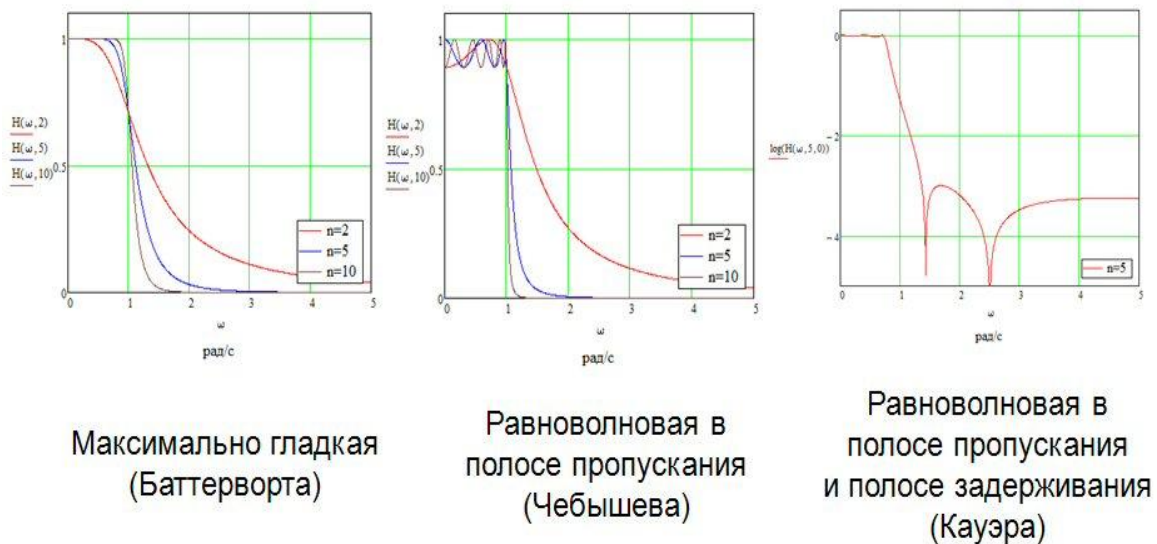


Рис.3. Основные типы частотных характеристик прототипов СВЧ фильтров

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cdot \arccos(\Omega)), & 0 \leq \Omega \leq 1 \\ \text{ch}(n \cdot \text{arch}(\Omega)), & \Omega > 1 \end{cases}.$$

Степень полиномов, а, следовательно, и число звеньев прототипа n может быть найдена из требований к крутизне затухания фильтра (рис.4)

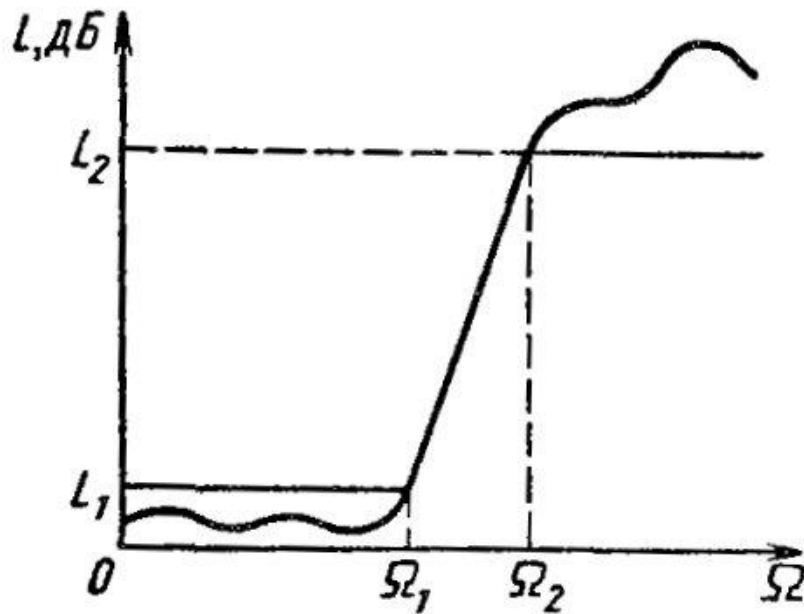


Рис.4. АЧХ прототипа фильтра СВЧ

Если задать два уровня ослабления L_1 и L_2 на частотах Ω_1 и Ω_2 , то для характеристики Баттерворта количество звеньев определится по формуле

$$n \geq \frac{\lg \sqrt{(L_2 - 1)/(L_1 - 1)}}{\lg(\Omega_2/\Omega_1)}, \quad L_{1,2} = 10^{L_{1,2, \text{дБ}}/10}$$

Аналогичное соотношение для фильтра Чебышева выглядит так:

$$n \geq \frac{\text{arch} \sqrt{(L_2 - 1)/(L_1 - 1)}}{\text{arch}(\Omega_2/\Omega_1)}, \quad L_{1,2} = 10^{L_{1,2, \text{дБ}}/10}$$

Реализация как максимально-плоской, так и Чебышевской характеристик приводит к лестничной схеме прототипа (рис.5).

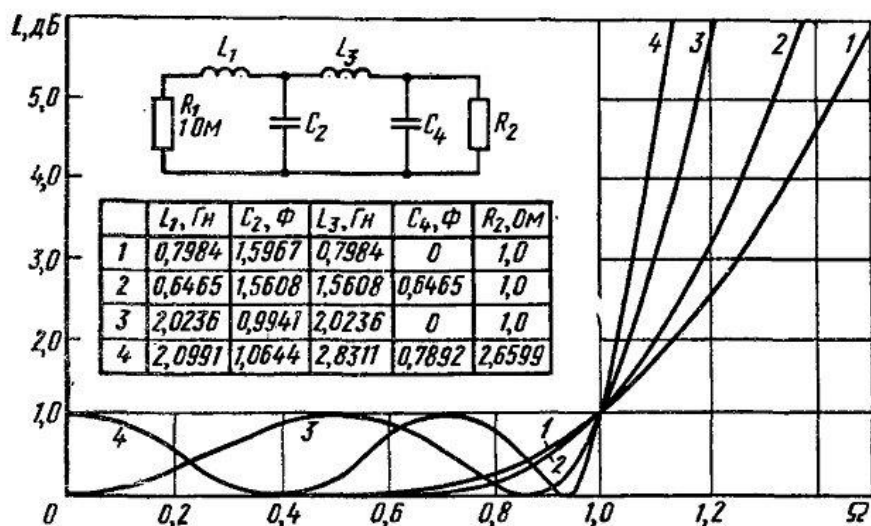


Рис.5. Вид прототипа фильтра СВЧ:

1,2 – Баттерворта 3 и 4 порядка, 3,4 – Чебышева 3 и 4 порядков

Параметры прототипа задают в виде справочных таблиц в виде, соответствующем нормированной частоте, единичных сопротивлениях генератора и нагрузки. Отметим особенность чебышевского прототипа четной степени – для него на нулевой частоте необходимо обеспечить ненулевое ослабление L_1 (см. рис.5). Для этого сопротивление нагрузки должно быть отлично от единицы.

Схему прототипа реального фильтра получают, проводя замену частотной переменной. Для ФНЧ заменяют нормированную частоту на действительную частоту $\Omega = k \cdot \omega = \frac{1}{\omega_c} \omega$ через коэффициент k . При этом все реактивные элементы L и C должны быть денормированы

$$L' = \frac{Z_0}{R_1} \cdot \frac{\Omega_1}{\omega_c} L = \frac{Z_0}{\omega_c} \cdot L ; \quad C' = \frac{R_1}{Z_0} \cdot \frac{\Omega_1}{\omega_c} C = \frac{1}{Z_0 \cdot \omega_c} \cdot C ; \quad R'_2 = \frac{Z_0}{R_1} \cdot R_2 = Z_0 \cdot R_2$$

Здесь $\Omega_1=1$ рад – нормированная частота среза, ω_c – истинная частота среза ФНЧ, Z_0 - волновое сопротивление источника, $R_1=1$ Ом- нормированное

сопротивление источника, R_2 – нормированное сопротивление нагрузки для чебышевского фильтра четного порядка.

Для ФВЧ замена частотной переменной $\Omega = -k_2 / \omega = -\frac{\omega_c}{\omega}$

эквивалентна перемене местами начала координат и бесконечно удаленной точки на частотной оси. Частотная характеристика прототипа преобразуется в АЧХ ФВЧ с той же частотой среза, реактивные элементы в прототипе заменяются на дуальные (рис.6)

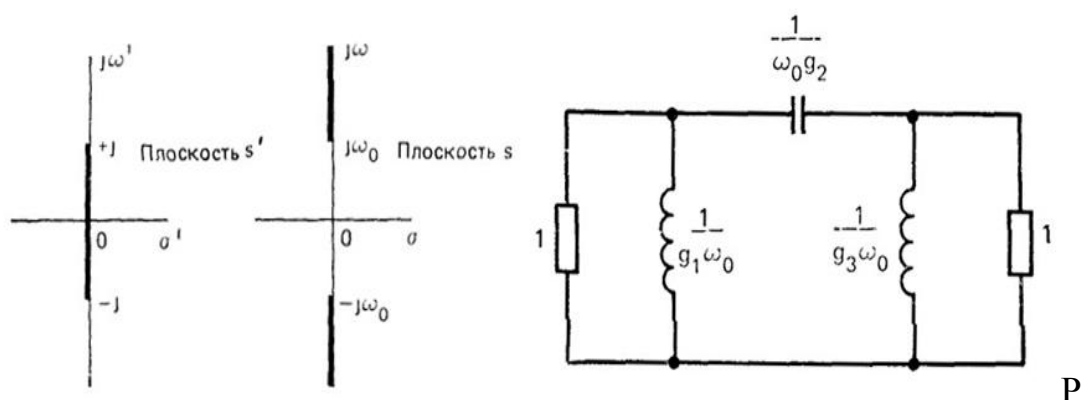


Рис.6. Частотное преобразование ФНЧ => ФВЧ

$$L' = \frac{1}{\omega_c C} \quad C' = \frac{1}{\omega_c L}$$

Если границы полосы пропускания ППФ обозначить ω_1 и ω_2 и $\omega_2 - \omega_1 = 2\Delta\omega = \frac{1}{k_3}$; $\omega_2 \cdot \omega_1 = \omega_0^2$, то замена частотной переменной

$$\Omega = k_3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

преобразует частотную характеристику прототипа в АЧХ полосно-пропускающего фильтра, симметричную относительно центральной частоты ω_0 (рис.7). Индуктивность в прототипе после замены превращается в последовательный колебательный контур с элементами

$$L' = \frac{L}{2\Delta\omega} \quad C' = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0^2 L}$$

Емкость прототипа превращается в параллельный колебательный контур с элементами

$$C' = \frac{C}{2\Delta\omega} \quad L' = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0^2 C}$$

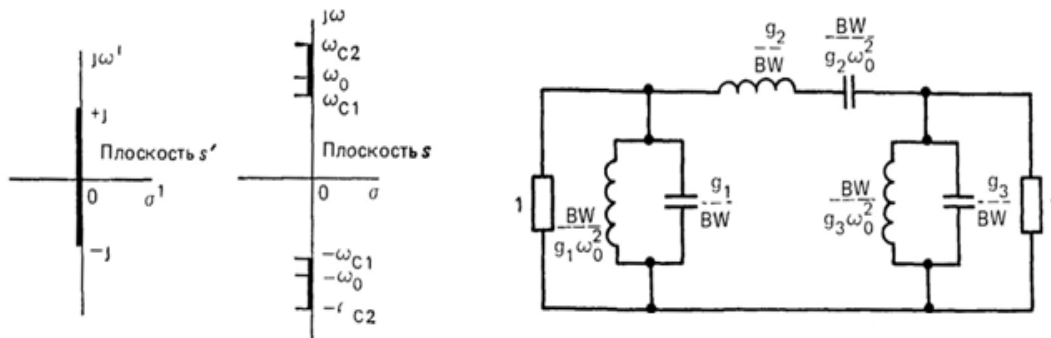


Рис.7. Частотное преобразование ФНЧ => ППФ

Для ПЗФ проводится аналогичное преобразование, но в качестве прототипа используется фильтр высокой частоты (то есть частотное преобразование производят два раза: ФНЧ => ФВЧ => ПЗФ. При этом параллельные индуктивности исходного прототипа ФНЧ преобразуются в последовательные контуры, последовательные емкости – в параллельные резонансные контуры (рис.8).

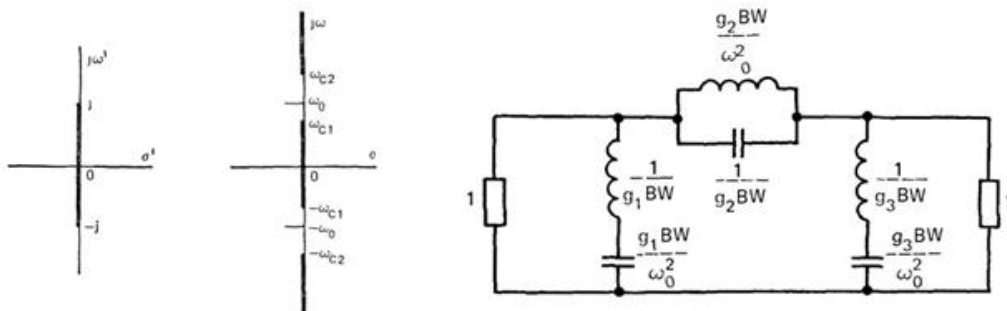


Рис.8. Частотное преобразование ФНЧ => ПЗФ

2. Реализация микрополосковых фильтров СВЧ

Для построения фильтра в СВЧ диапазоне требуется заменить индуктивности и емкости схемы его прототипа реальными элементами. На относительно низких частотах удается это сделать, используя квазисосредоточенные микрополосковые индуктивности и конденсаторы. Это могут быть свернутые в кольцо или спираль отрезки тонких МПЛ, пленочные конденсаторы. Последовательную емкость можно реализовать узким разрывом центрального проводника МПЛ.

Более распространенный прием реализации – замена реактивных элементов схемы фильтра отрезками линий передачи. Длина и волновое сопротивление их выбирают так, чтобы в пределах полосы пропускания фильтра эквивалентная схема отрезка линии приблизительно была бы равна требуемому значению реактивности. Для ППФ и ПЗФ используют четверть- и полуволновые резонаторы на отрезках МПЛ. Резонаторы связывают либо непосредственно (например, через торцовые емкости, через связанные полосковые линии- фильтры с параллельно-связанными резонаторами, фильтры на встречных стержнях), либо через отрезки линий передачи (например, фильтры на резонаторах с четвертьволновыми связями).

В лабораторной работе исследуются микрополосковые фильтры низких и высоких частот шлейфного типа, ППФ и ПЗФ на связанных резонаторах.

Рассмотрим реализацию ФНЧ. Он строится на основе чебышевского прототипа 7 порядка (рис.9а).

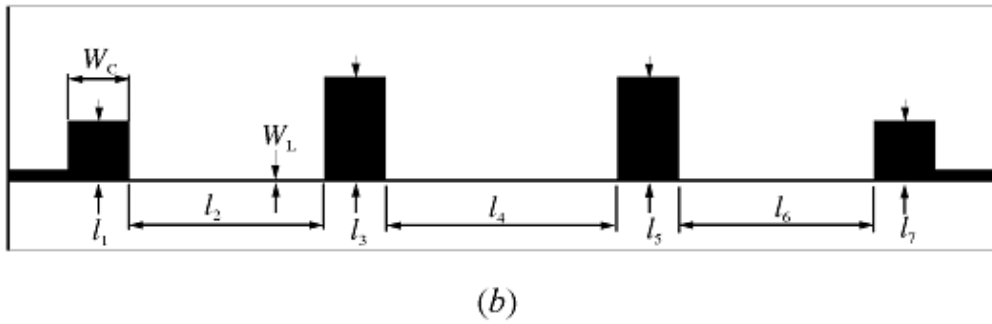
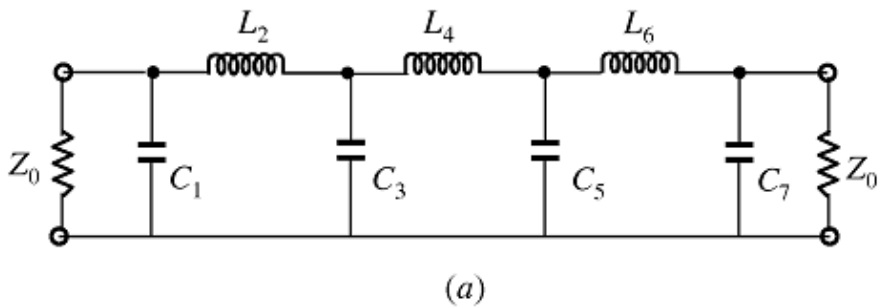


Рис.9. Реализация ФНЧ с разомкнутыми шлейфами (open-ended stubs filter)

Индуктивности в нем реализованы отрезками линий длиной l с большим волновым сопротивлением $Z_1 \gg Z_0$ (рис.10). Приближенно, при $l \leq \frac{\Lambda}{8}$ индуктивность можно выразить в виде $L = \frac{2\pi Z_1 \cdot l}{\omega \Lambda}$, где Λ - длина волны в МПЛ.

Параллельные емкости схемы реализованы в виде разомкнутых шлейфов с волновым сопротивлением $Z_1 \ll Z_0$. При длине шлейфа $l \leq \frac{\Lambda}{8}$ входную емкость разомкнутого шлейфа можно записать в виде $C = \frac{2\pi \cdot l}{\omega \Lambda Z_1}$.

Для увеличения емкости используют симметричное подключение двух шлейфов в одну точку.

Отметим, что при малой длине шлейфов такой элемент лучше представить в виде скачка волнового сопротивления основной МПЛ (рис.11).

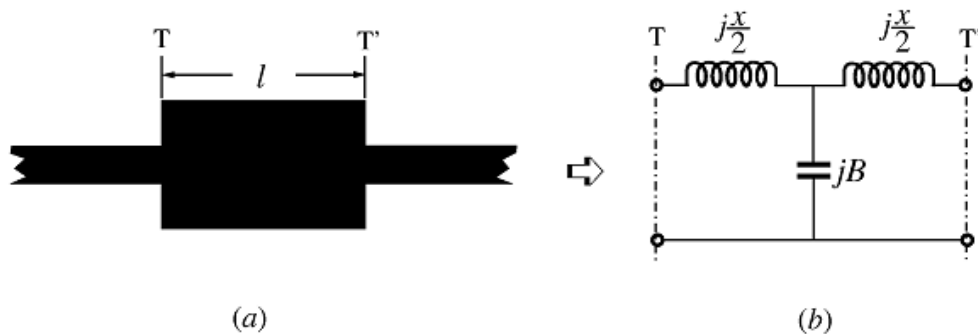


Рис.11. Реализация последовательных индуктивностей в схеме ФНЧ

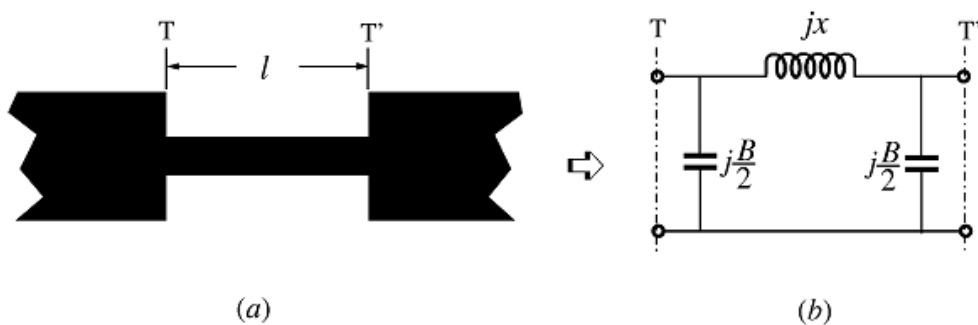


Рис.10. Реализация последовательных индуктивностей в схеме ФНЧ

Он эквивалентен параллельной емкости, рассчитываемой по приближенной формуле $C = \frac{\Lambda \cdot l}{2\pi Z_1}$, где Z_1 – волновое сопротивление отрезка линии Т-Т' длиной l . ФНЧ с такой реализацией схемы прототипа представляет собой набор отрезков линий передачи с разным волновым сопротивлением. Фильтры, в которых сосредоточенные элементы заменены короткими отрезками линий передачи, часто реализуют в коаксиальном и микрополосковом вариантах.

Одна из возможных реализаций ФВЧ представляет собой 6 короткозамкнутых шлейфов, включенных в МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом (рис.12).

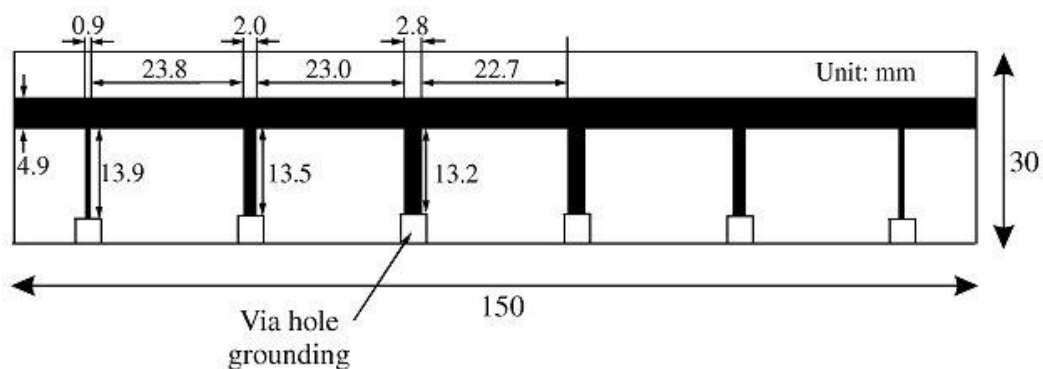


Рис.12. ФВЧ на короткозамкнутых шлейфах
(short-circuit stubs filter)

Расстояния между шлейфами практически одинаковы, длины шлейфов примерно в два раза меньше. Реализация элементов схемы прототипа фильтра осуществляется подбором волновых сопротивлений шлейфов. Структура фильтра имеет периодический характер, поэтому АЧХ фильтра также имеет повторяющиеся полосы заграждения в области высоких частот. Фильтры ВЧ с такими характеристиками иногда называют псевдоФВЧ.

Для реализации ППФ используют микрополосковые резонаторы различного вида. В лабораторной работе исследуются ППФ, включающие набор полуволновых резонаторов, свернутых в виде буквы “U” так , что они похожи на «шпильки для волос» (Hairpin). Такие шпилечные конструкции обладают малыми габаритами как в длину, так и в ширину (рис.13).

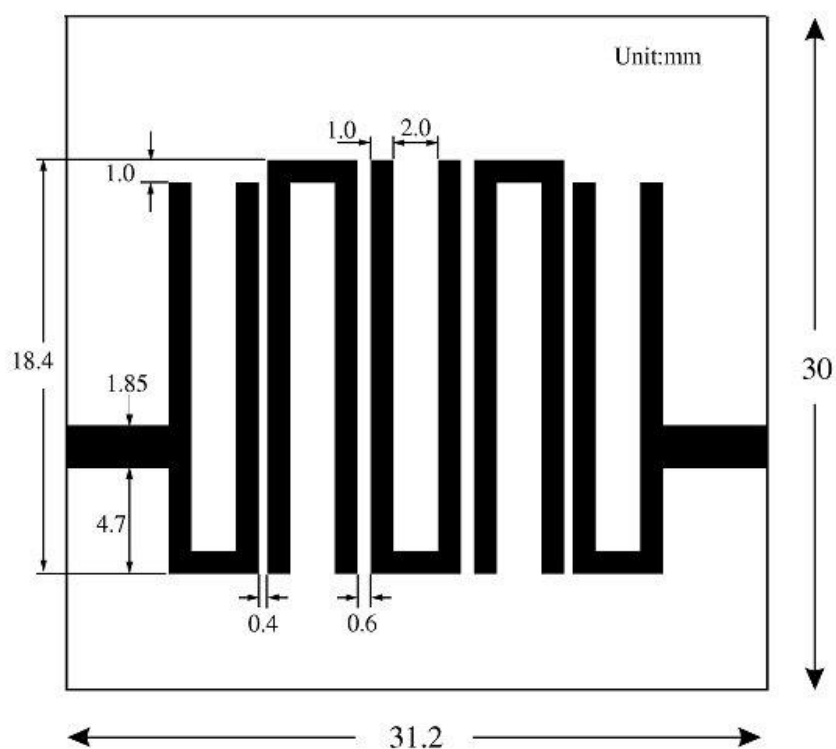


Рис.13. ППФ шпилечного типа (Hairpin-line filter)

На рисунке приведен один из вариантов реализации фильтра Чебышева 5 порядка. Резонаторы фильтра взаимодействуют между собой через отрезки связанных МПЛ. Подводящая линия подключается к крайним резонаторам на расстоянии от края так, чтобы обеспечить

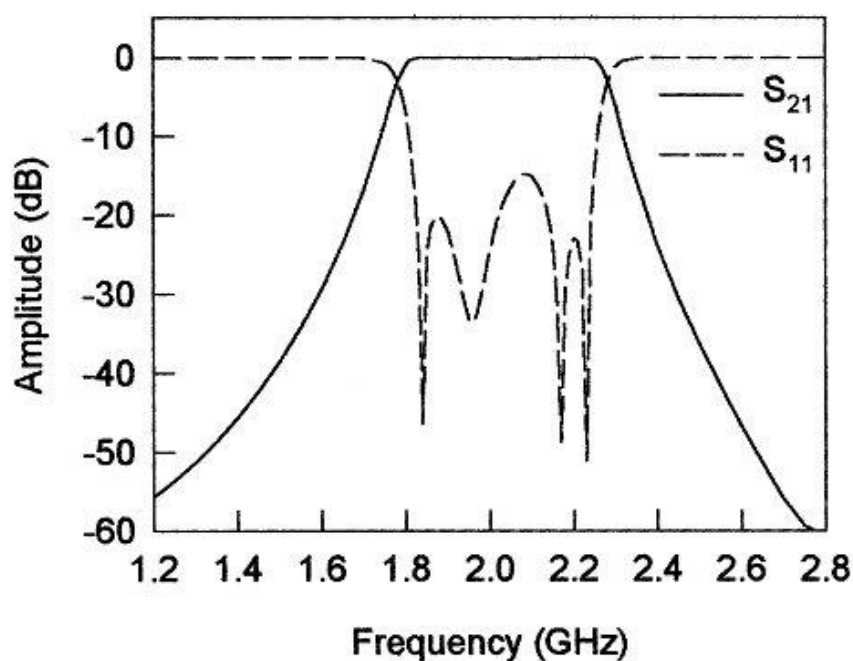


Рис.14. АЧХ ППФ шпилечного типа

входное фильтра 50 Ом. Частотная характеристика фильтра представлена на рис. 14.

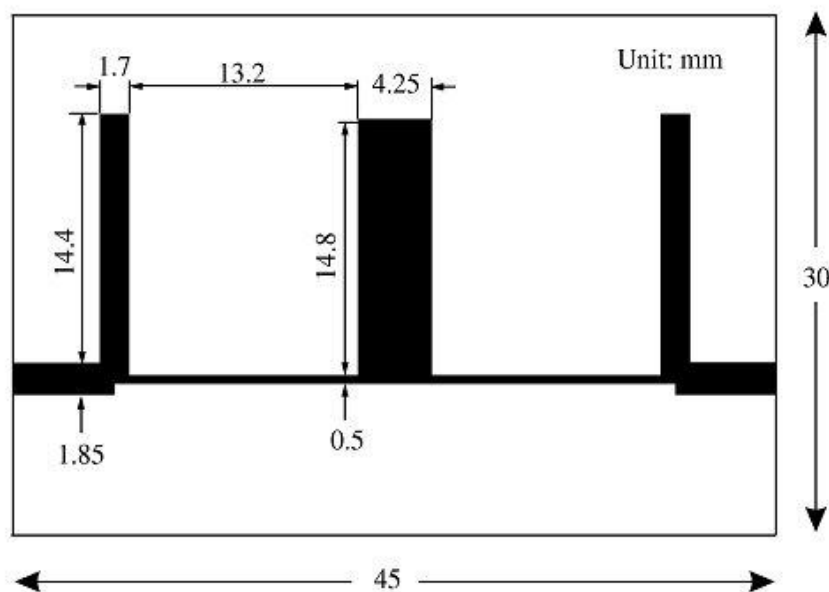


Рис.15. ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

Для полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ) удобно использовать конструкцию с разомкнутыми четвертьволновыми шлейфами шлейфами (рис. 15).

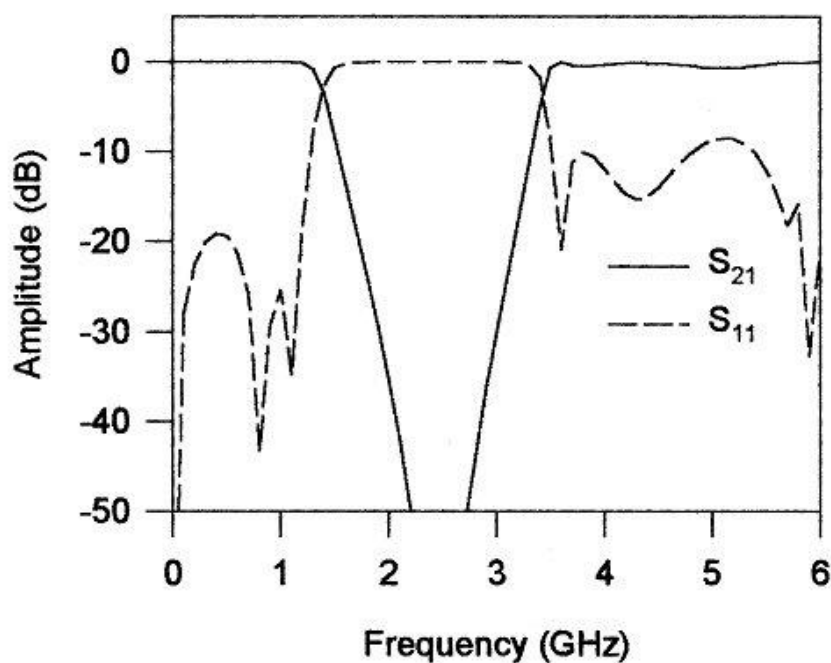


Рис.16. АЧХ ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

Шлейфы соединены между собой четвертьволновыми отрезками линии большего волнового сопротивления, чем у шлейфов. Частотная характеристика такого фильтра приведена на рис. 16.

3. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используется автоматический анализатор цепей Agilent E5062A. Он позволяет одновременно получить частотные зависимости модулей и аргументов коэффициентов S_{11} и S_{21} исследуемого фильтра. Для измерения элементов S_{12} и S_{22} требуется переключить направление подачи сигнала, то есть подключить фильтр наоборот.

Прибор подробно изучается в лабораторной работе «Автоматический анализатор параметров СВЧ цепей Agilent E5062A». При измерении параметров фильтров используют следующие режимы 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 уровня АЧХ
3. Измерение ЧХ коэффициентов S_{11} и S_{21} в полном масштабе по уровню;
4. Использование режима электронных меток для определения параметров фильтра;
5. Измерение ЧХ в полосе пропускания (или заграждения) в крупном масштабе;
6. Сохранение полученных результатов в текстовом файле для дальнейшего использования в среде Microwave Office.

Исследуются микрополосковые фильтры СВЧ 4 типов: ФНЧ – фильтр с разомкнутыми шлейфами, ФВЧ – фильтр с КЗ шлейфами, ППФ- фильтр со связанными полуволновыми резонаторами типа Hairpin, ПЗФ – фильтр с полуволновыми шлейфами (рис.17).

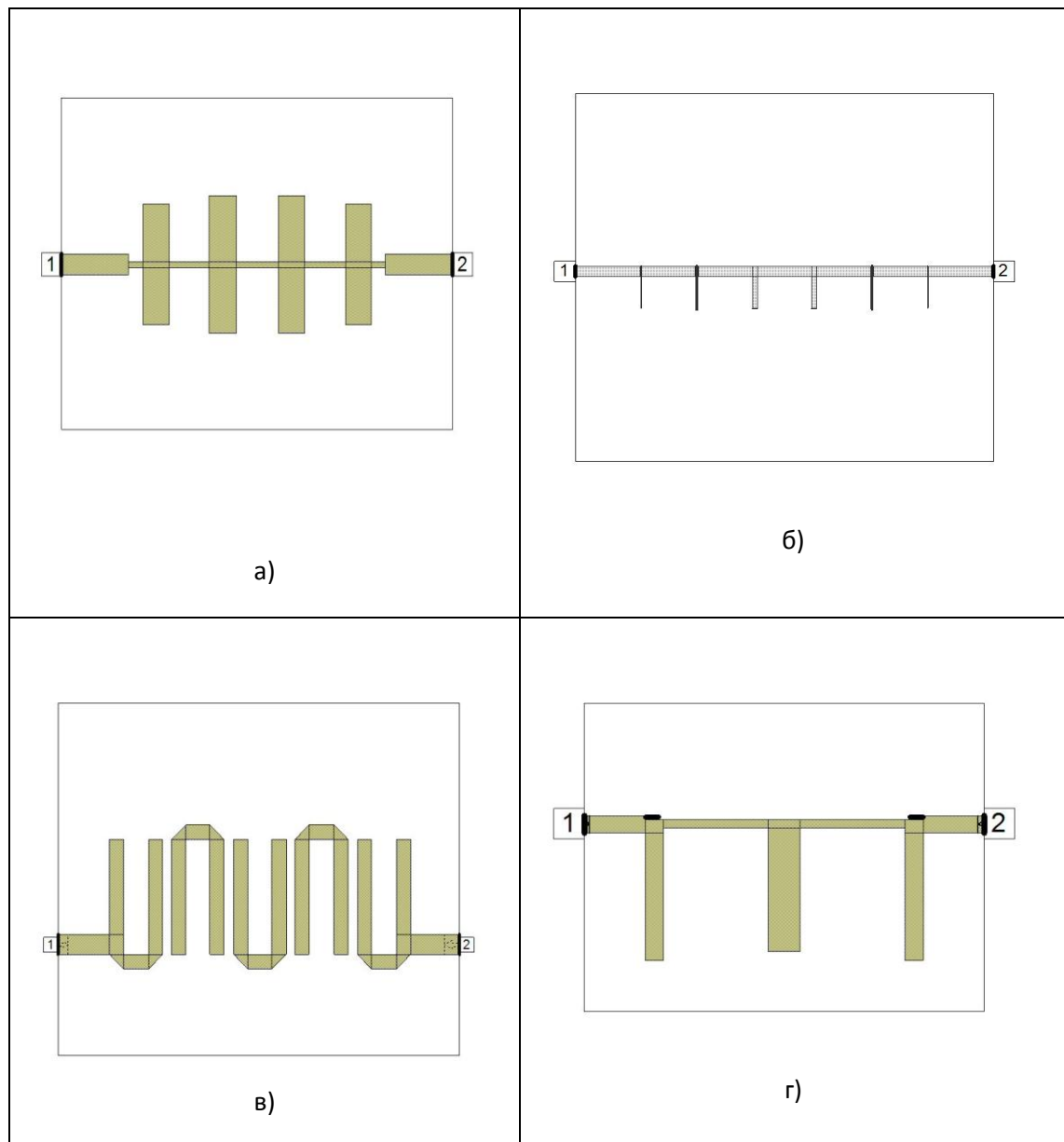


Рис.17. Топология фильтров, исследуемых в лабораторной работе:

а) ФНЧ (LPF); б) ФВЧ (HPF); в) ППФ (BPF); г) ПЗФ (BSF);

Фильтры выполнены на подложке ПТФЕ и смонтированы в металлических корпусах с прозрачной крышкой. Вход и выход фильтров снабжены переходами с МПЛ на разъем типа SMA-F. Соединение анализатора цепей СВЧ Agilent E5062A с фильтром производится короткими отрезками коаксиального кабеля. Электромагнитное и схемотехническое моделирование и расчет характеристик фильтров осуществляется в среде компьютерного проектирования Microwave Office 2009.

В процессе работы исследуются два из четырех типа фильтров. Дополнительно (по указанию преподавателя) исследуется также проходной кольцевой резонатор (Ring).

4. Задание и указания к выполнению работы

4.1. Подготовка прибора к работе

Включите анализатор цепей E5062 и дождитесь загрузки сервисной программы. Установите полный диапазон частот 300кГц-3ГГц и проведите калибровку прибора в этом диапазоне. Калибровка выполняется вместе с соединительными кабелями с помощью четырех образцовых элементов: меры XX, короткозамыкателя (КЗ), согласованной нагрузки 50 Ом (СН) и соединителя -отрезка линии.

Для исследования ЧХ фильтров достаточно провести 1-портовую калибровку и калибровку Thru – «на проход».

Калибровка порта источника (1 порта) по параметру S11 выполняется так:

- Выберите тип калибровки **Calibrate -> 1-Port Cal.**

- Подключите через кабель и соединитель F-F нагрузку XX к измерительному порту 1 и нажмите **Open**.
- Подключите КЗ нагрузку и нажмите **Short**. Затем подключите согласованную нагрузку к порту и нажмите **Load**.
- Не забудьте нажать **Done** для завершения калибровки!!!!.

Калибровка «на проход» ведется по параметру S21:

- В подменю **Calibrate** выберите пункт **Response (THRU)**.
- Соедините кабели порта 1 и порта 2 с помощью перемычки типа F-F.
- Нажмите **Thru** для начала калибровки.
- Нажмите **Done** для завершения калибровки.

В заключение проверьте, включена ли калибровка (**Correction -> ON**) для всех каналов. Прибор готов для измерений в полном частотном диапазоне.

4.2. Установка частотного диапазона исследования фильтров

Подключите исследуемый фильтр к портам прибора. Установите число каналов 2, формат вывода – один над другим. Для этого необходимо нажать **Display -> Allocate Channels** и выбрать из списка нужный способ отображения каналов (один под другим).

Для переключения между окнами каналов можно пользоваться клавишами на лицевой панели прибора **Channel Next** (следующий канал), **Channel Prev** (предыдущий канал), кнопками экранного меню или щелчком правой кнопки мыши на окне требуемого канала.

Внимание: На втором канале при его создании по умолчанию стоит однократная развёртка (значок # в правом нижнем углу экрана канала). Для проведения измерений в новом канале необходимо установить непрерывный запуск развертки!!. Чтобы задать тип запуска необходимо:

Выбрать требуемый канал и нажать **Trigger**. Затем необходимо выбрать тип запуска **Continuous** (режим непрерывной развёртки).

Установите в первом канале количество графиков - 2, измеряемые параметры - S21 и S11, формат отображения – логарифмический (в дБ), во втором канале режим измерения – S11, формат – коэффициент стоячей волны SWR. Для выбора количества отображаемых графиков в активном канале необходимо нажать **Display->Number of Traces**, затем требуемую цифровую клавишу 2.

Для выбора измеряемого параметра необходимо:

- Выбрать текущий канал и график;
- Нажать **Measurement**;
- Выбрать требуемый параметр матрицы рассеяния (**S11** или **S21**).

Для выбора формата отображения необходимо:

- Указать необходимый график;
- Нажать **Format** и с помощью программируемой клавиши выбрать требуемый формат вывода данных **Log Mag** (прямоугольная система координат, логарифмическая шкала) или, **SWR** (прямоугольная система координат, KCB).

Установите удобный масштаб по вертикали для наблюдения графиков.

В приборе предусмотрены два режима установки масштабов – автоматический (автоподстройка) и ручной. В режиме автоподстройки прибор сам подбирает масштаб осей графика для наилучшего отображения измеряемых данных, устанавливает начало координат (опорный уровень) и цену деления шкалы.

Включите автоподстройку для чего необходимо:

- Выбрать требуемые канал и график;
- Нажать **Scale -> Auto Scale**.

Если необходимо провести автоподстройку для всех графиков в канале, то надо выбрать требуемый канал и нажать **Scale -> Auto Scale All**.

Для улучшения вида графиков после автоподстройки используйте ручной режим масштабирования графиков, подбирая :

- Число делений по оси Y (**Divisions**) - в нашем случае удобно использовать 10 делений;
- Цену деления (**Scale/Div**) масштабной сетки по оси Y активного графика;
- Положение опорного уровня (**Reference Position**) активного графика (указывается номер деления шкалы опорного уровня);
- Значение опорного уровня (**Reference Value**).

В окнах каждого канала должны получиться графики АЧХ фильтра.

Выберите начальную и конечную частоты в каждом канале отдельно, соответствующие ширине АЧХ зависимости модуля S21 (например, по уровню -50...-60 дБ для ППФ) и диапазону изменения КСВ (например, в пределах 1...10).

Установить частотный диапазон можно несколькими способами:

- Ввести клавишами **Start**, **Stop** и цифровыми клавишами начальную и конечную частоту диапазона.
- Нажать клавишу **Center** и цифровыми клавишами ввести значение центральной частоты. Клавишей **Span** + цифровые клавиши установить ширину диапазона относительно центральной частоты.

То же самое можно сделать в пункте меню **Display -> Frequency**.

Удобно устанавливать диапазона качания частоты с помощью маркеров. Для этого необходимо:

- Выбрать требуемые канал и график;
- Нажать **Marker**. На экране появится маркер с номером 1. При

необходимости можно активизировать и дополнительные маркеры (2,3,4). Нажатие кнопки **Marker №** включает маркер (если он был выключен) или делает маркер активным.

- В окне канала, в котором должен быть изменён диапазон, с помощью мыши надо поместить маркер на активном графике в положение, соответствующее нижнему, верхнему или центральному значению нового диапазона частот.
- Нажать клавишу **Marker Fctn**.
- Выбрать нужную программируемую клавишу: **Marker —> Start**, **Marker —> Stop**, **Marker —> Center**.
- При необходимости вручную подберите масштабы изображения в подменю **Stimulus -> Start (Stop, Center, Span)**.

Включите режим измерения параметров фильтра. Он позволяет для ППФ и ФВЧ определить полосу пропускания(BW), центральную частоту (cent) и точки отсечки (верхнюю частоту отсечки (high) и нижнюю частоту отсечки (low)), добротность (Q) и вносимые потери (loss) - ослабление в точке активного маркера. Поиск ведется относительно уровня активного маркера. Определения параметров, используемых при поиске полосы, приведены на рис. 18.

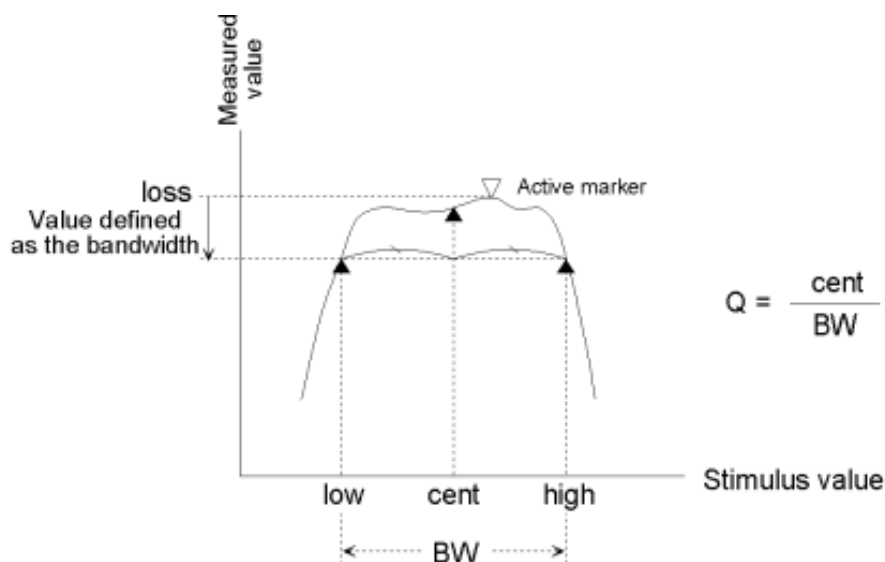


Рис. 18. Параметры полосы пропускания ППФ

Для реализации режима измерения поиска полосы ППФ и ФВЧ фильтров по вносимому ослаблению (S21) необходимо:

- Поместить активный маркер в точку максимума на графике. Для этого необходимо нажать клавишу **Marker Search** и установить маркер в максимум АЧХ кнопкой **Max**.
- Установить уровень, по которому отсчитывается полоса **Bandwidth Value** (по умолчанию используется уровень -3 дБ).
- Выбрать переключатель **Bandwidth -> ON**. В левой верхней части поля графика на экране отобразятся шесть параметров фильтра. Запишите полученные результаты.

Для поиска параметров по КСВ необходимо найти его минимум **Marker Search -> Min**, а затем установить уровень КСВ на границах полосы

Bandwidth Value (например =2) и включить режим поиска полосы **Bandwidth** -> **ON**.

Для исследования фильтров низкой частоты в приборе E5062A предусмотрен удобный режим измерения параметров ФНЧ. Для его использования надо нажать клавишу **Marker Fctn** и выбрать подпункт **RF Filter Stat->ON**. В левой верхней части поля графика на экране параметры 4 маркеров. Установите вручную их на характерные точки АЧХ коэффициента передачи S21 фильтра (максимум, минимум в полосе, точка по уровню -3 дБ и пр – см. рис.18). Запишите полученные результаты .

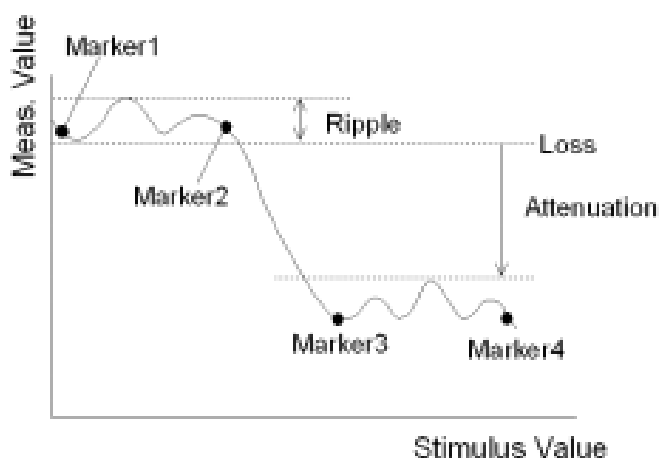


Рис. 19. Параметры ФНЧ.

Если исследуется полосно-запирающий фильтр (ПЗФ), то для определения полосы заграждения коэффициента передачи S21 используйте режим поиска провала АЧХ (Notch). Для использования этого режима необходимо:

- Поместить активный маркер слева от полосы заграждения, нажать клавишу **Marker Search** и найти максимум АЧХ S21 нажав кнопку **Max**.

- Установить уровень, по которому отсчитывается полоса запираания **Notch Value** (например, -40дБ).

- Выбрать переключатель **Notch -> ON**. В левой верхней части поля графика на экране отобразятся шесть параметров фильтра. Запишите полученные результаты .

Сделайте дампы экрана каждого канала в виде графического файла формата .bmp (256 color) . Имя файла и его расположение выбирают в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени производят с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой “Input from the front panel”.

Процедура запоминания образа экрана:

- Выберите вид изображения – с белым фоном (**System -> Invert Image -> On**).
- Для записи образа в файл нажмите **Dump Screen Image**. В окне диалога укажите расположение и имя файла и нажмите **Save**.

Сохраните данные первого канала (модули S11,S21) в текстовые файлы типа CSV (текстовый файл с разделителем - запятой). В приборе используется следующий формат выводимой информации по строкам: шапка данных -> номер активного канала, номер активного графика, строка заголовка; далее следуют строки данных -> частота, данные графика.

Процедура запоминания данных графика:

- Выбрать канал и запоминаемый график.
- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать **Save Trace Data** и в диалоговом окне ввести имя файла и место его расположения.

Эти данные необходимы для сравнения с результатами моделирования в среде Microsoft Office, поэтому их надо свести в один файл в формате s2p (формат Touchstone).

5. Вывод данных измерения в формате Touchstone

Один из наиболее популярных форматов файлов, используемый для обмена информацией между измерительной аппаратурой и системами компьютерного моделирования – это Touchstone file (файл в формате SnP). Это довольно просто организованный 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 фирмы Agilent.

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 частотных характеристик четырехполюсника имеет расширение .s2p);
- Строки комментариев предваряются знаком !;
- Данные предваряются линией опций следующего 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 идет раньше, чем параметр 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 четырёхполюсника в файл test.s2p:

!2-port S-parameter file, three frequency points

GHZ S RI R 50.0

!freq ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22

1.0000 0.3926 -0.1211 -0.0003 -0.0021 -0.0003 -0.0021 0.3926 -0.1211

2.0000 0.3517 -0.3054 -0.0096 -0.0298 -0.0096 -0.0298 0.3517 -0.3054

10.000 0.3419 0.3336 -0.0134 0.0379 -0.0134 0.0379 0.3419 0.3336

В настоящее время применяют также формат touchstone file v.2.0, который дополнен вводом числа портов, количества частотных точек, указанием версии формата и пр.

К сожалению, в приборе E5062A вывести полный файл данных в формате s2p (для двухпортового устройства) не удастся. Поэтому приходится объединять данные двух графиков, выводимых в тестовом формате CSV.

Для объединения данных можно использовать Microsoft Excel. Примерная схема операции такова:

- Загрузить файл Touchstone.xls – он содержит заголовок файла

Hz S DB R 50. Можно ввести такой заголовок в новую книгу Excel вручную.

- Используйте режим «Получение внешних данных – из текста» и экспортируйте файл S11. Режим экспорта – с разделителем, импорт с 4 строки, разделитель – запятая, формат данных всех столбцов- текстовый!!! . Разместите полученные данные в начало второй строки. Аналогично экспортируйте данные коэффициента S21, разместив их в 4 и 5 столбцы 2 строки. Для завершения файла необходимо добавить данные S12 и S22, измерения которых не проводилось. Заполните недостающую часть таблицы имеющимися данными S11 и S21- скопируйте столбцы 4,5 в столбцы 6,7, а столбцы 2,3 – в столбцы 8,9.
- Сохраните полученный файл в текстовом виде (разделитель – табулятор) с расширением .s2p.

Файл готов к загрузке в программу MWO.

6. Компьютерное моделирование фильтров

В программу работы входит два варианта моделирования исследуемых фильтров – электродинамическое - с использованием EMSight модели и схмотехническое моделирование. Файлы проектов называются XXX_EM0.emp и XXX_Schem0.emp, где XXX – название типа фильтра (LPF,HPF,BPF или BSF). В проектах представлены готовые EM structeres для всех типов фильтров, а также схмотехническое их представление в виде МП

элементов. Размеры и свойства элементов соответствуют исследуемым фильтрам и не требуют корректировки.

Задачи расчетной части работы:

- Провести расчеты моделей фильтра в оптимальном для фильтра частотном диапазоне.
- Построить графики частотных характеристик элементов матрицы рассеяния и КСВ. Отдельно построить графики ослабления и КСВ в полосе пропускания (или в полосе запирания для ПЗФ).
- Сравнить результаты электромагнитного и схемотехнического моделирования на одном графике. Для этого надо использовать вывод результатов электромагнитного моделирования в внешний файл (Output File) типа s2p или внести схемотехническую модель в проект электромагнитного моделирования.
- В проект схемотехнического моделирования ввести данные измерений из файла формата s2p и построить их на одном графике с расчетными характеристиками.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурные схему установки, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей, результаты моделирования фильтров в среде MWO.

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.:Радиотехника, 2008.-184с
2. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ.
3. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях.
4. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
5. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988-280с.
6. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.