



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)

Исследование частотных характеристик фильтров СВЧ

Санкт-Петербург

2023 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ СВЧ

В лабораторной работе студенты знакомятся с фильтрами сверхвысоких частот (СВЧ) различного назначения, реализованными в микрополосковом варианте. Изучаются общие методы их проектирования и методы измерения параметров фильтров с помощью автоматизированного анализатора СВЧ-цепей Agilent E5062A.

1.1. Общие сведения о фильтрах СВЧ-диапазона

Фильтры СВЧ в радиотехнике применяются для частотной селекции сигналов. Особенностью фильтров СВЧ является их реализация в виде распределенных структур (отрезков линий передачи). Этим они отличаются от обычных электрических фильтров, в которых используются сосредоточенные LC -элементы. Основная характеристика фильтра СВЧ – это частотная зависимость вносимого *ослабления* (затухания) $A[\text{дБ}] = L[\text{дБ}] = -20 \lg(|S_{21}|)$ в СВЧ-тракт. 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. 1.1):

- фильтры нижних частот (ФНЧ, Low Pass Filters – LPF);
- фильтры верхних частот (ФВЧ, High Pass Filters – HPF);
- *полосно-пропускающие* фильтры (ППФ, Band Pass Filters – BPF);
- *полосно-заграждающие* (режекторные) фильтры (ПЗФ, Band Stop Filters – BSF).

При проектировании фильтров обычно задают среднюю частоту и ширину *рабочей полосы частот* (BandWidth – BW) для определенного уровня потерь в полосе. Например, полоса пропускания для ППФ по умолчанию устанавливается на уровне 3 дБ (Passband – BW3dB), а полоса заграждения – по уровню 40 дБ (Stopband – BW40dB).

Важными параметрами реальных фильтров являются допустимое ослабление в полосе пропускания (Passband Insertion Loss) и требуемое ослабление в полосе заграждения (Stopband Insertion Loss), уровень неравномерности (пульсации) коэффициента передачи (ослабления) в полосе пропускания (Passband Ripple) и (или) в полосе заграждения (Stopband Ripple), коэффициенты стоячей

волны по напряжению (КСВН, Voltage Standing Wave Ratio – VSWR) по входу и выходу фильтра в рабочем диапазоне частот.

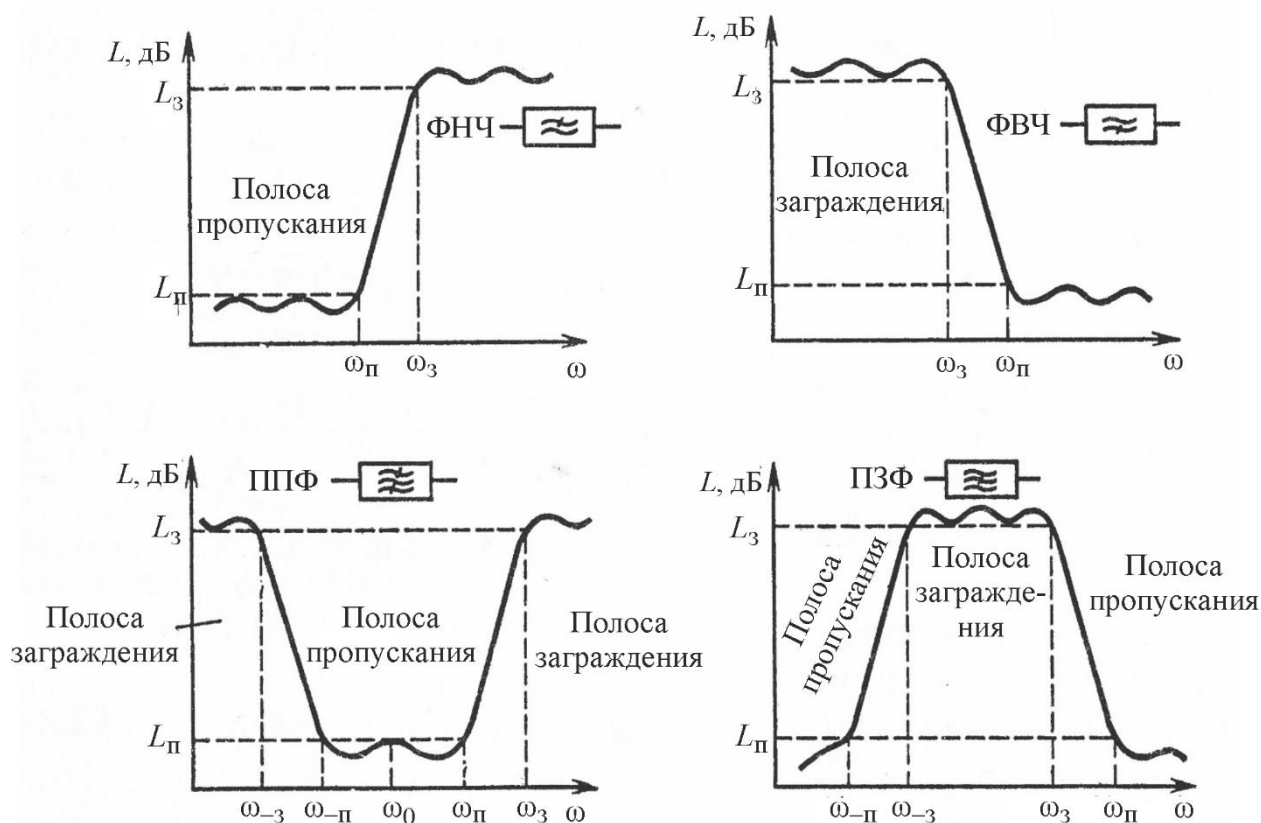


Рис. 1.1. Типы частотных характеристик ослабления фильтров СВЧ

В широкополосных системах передачи информации большое значение имеет вид фазочастотной характеристики фильтра (ФЧХ). Отклонение ее от линейной функции в полосе пропускания приводит к неравномерности ЧХ группового времени запаздывания (ГВЗ). Это может вызвать искажение формы сигналов, проходящих через фильтр.

Фильтры СВЧ часто строят как соединение простых элементов – резонаторов, шлейфов, отрезков линий передачи и пр. Частотные характеристики этих узлов на СВЧ достаточно сложны, что затрудняет синтез фильтра по заданным параметрам. Поэтому проектирование фильтров СВЧ в большинстве случаев осуществляют *методом низкочастотных (НЧ) прототипов*. Он основан на представлении схемы замещения реального фильтра в виде нормированной лестничной LC-схемы ФНЧ, для которого задана аппроксимация амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в виде физически реализуемой функции передачи. Эту функцию описывают полиномами разного вида. Степень полинома

соответствует числу элементов прототипа. Чем выше степень полинома, тем больше приближение АЧХ фильтра к идеальной (прямоугольной) форме.

В СВЧ-технике применяют несколько видов частотных характеристик фильтров (рис. 1.2).

Тип фильтра	Особенности	Вид АЧХ
Баттерворта	Монотонная и наиболее плоская АЧХ; монотонная ФЧХ по 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. 1.2. Виды аппроксимации АЧХ фильтров

Наиболее распространенные виды характеристик – это максимально плоская АЧХ (Баттерворта) и равномерно-колебательная АЧХ (Чебышева) (рис. 1.3). В ряде случаев используют эллиптическую характеристику фильтра

Кауэра, которая отличается повышенным ослаблением на отдельных частотах в полосе заграждения (нулях коэффициента передачи).

Характеристика вносимого затухания для фильтра Баттерворта задается полиномом $L(\Omega) = 10 \lg(1 + \gamma^2 \Omega^{2n})$, где $\Omega = \omega / \omega_c$ – частота, нормированная к заданной границе полосы пропускания (ω_c – частота среза фильтра). Величина ослабления на частоте среза L_c определяется коэффициентом γ полинома $L_c = 10 \lg(1 + \gamma^2)$. Фильтры с максимально плоской характеристикой используют в случае, когда требования к ослаблению в полосе заграждения не слишком велики, а к свойствам фильтра в полосе пропускания (малые потери, равномерность АЧХ и ФЧХ) достаточно жесткие.

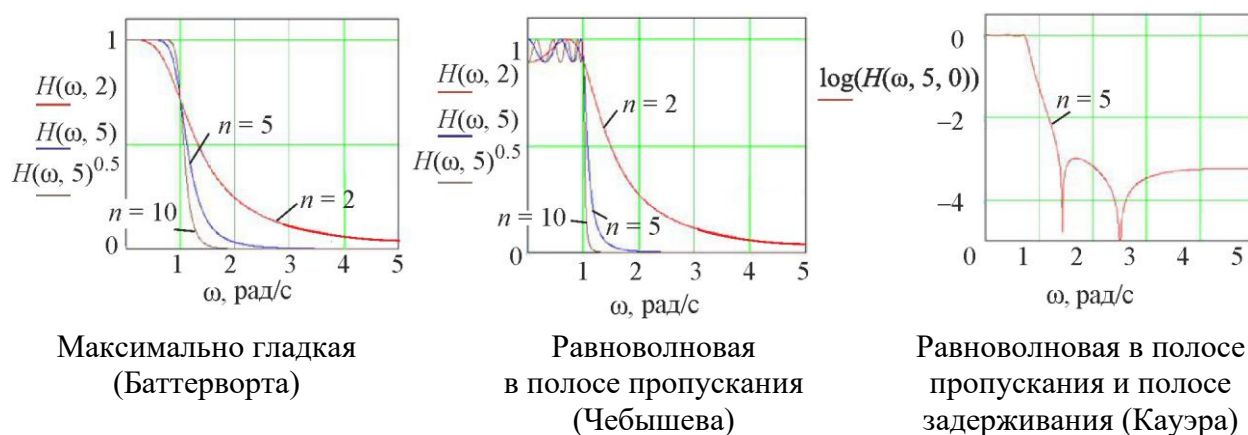


Рис. 1.3. Основные типы частотных характеристик прототипов СВЧ-фильтров

Равноволновая характеристика Чебышева позволяет получить лучшее ослабление в полосе заграждения и более крутой наклон АЧХ. Она описывается выражением $L(\Omega) = 10 \lg(1 + \gamma^2 T_n^2(\Omega))$, где

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

– полином Чебышева n -й степени:

Степень полинома, а следовательно, и число звеньев прототипа n выбирают, исходя из требований к крутизне склона АЧХ фильтра (рис. 1.4).

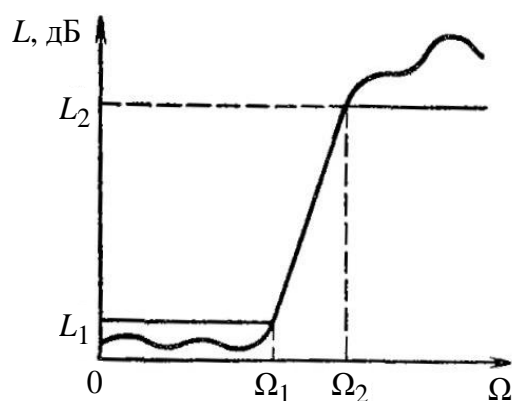


Рис. 1.4. Нормированная АЧХ прототипа фильтра Чебышева

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

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

Аналогичное соотношение для фильтра Чебышева имеет вид

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

Реализация как максимально-плоской, так и чебышевской характеристик приводит к лестничной схеме прототипа (рис. 1.5).

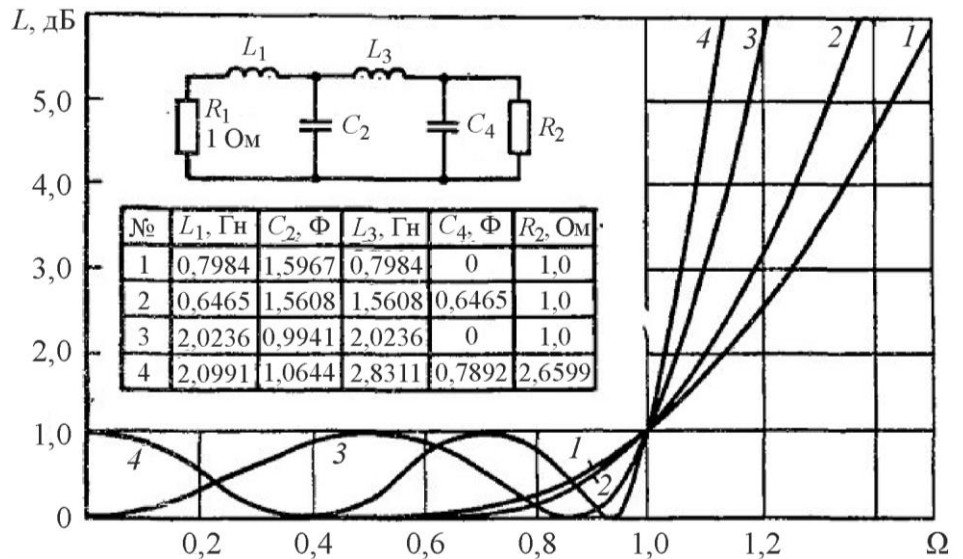


Рис. 1.5. Вид лестничного прототипа фильтра СВЧ:
1, 2 – Баттерворта 3-го и 4-го порядка; 3, 4 – Чебышева 3-го и 4-го порядка

Параметры прототипа задают в формате справочных таблиц для нормированной частоты и единичных сопротивлений генератора R_1 и нагрузки R_2 . Отметим особенность чебышевского прототипа четной степени, большей 2: для него на нулевой частоте необходимо обеспечить ненулевое ослабление L_1 (рис. 1.5). Для этого сопротивление нагрузки R_2 прототипа должно быть отличным от единицы.

Схему прототипа реального фильтра получают заменой частотной переменной. Для ФНЧ заменяют нормированную частоту на действительную частоту $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$ через реальную частоту среза ω_c . При этом все реактивные элементы L и C должны быть денормированы:

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

$$R'_2 = \frac{Z_0}{R_1} R_2 = Z_0 R_2.$$

Здесь Z_0 – волновое сопротивление источника; $\Omega_1 = 1$ рад – нормированная частота среза; $R_1 = 1$ Ом – нормированное сопротивление источника; ω_c – истинная частота среза ФНЧ; R_2 – нормированное сопротивление нагрузки.

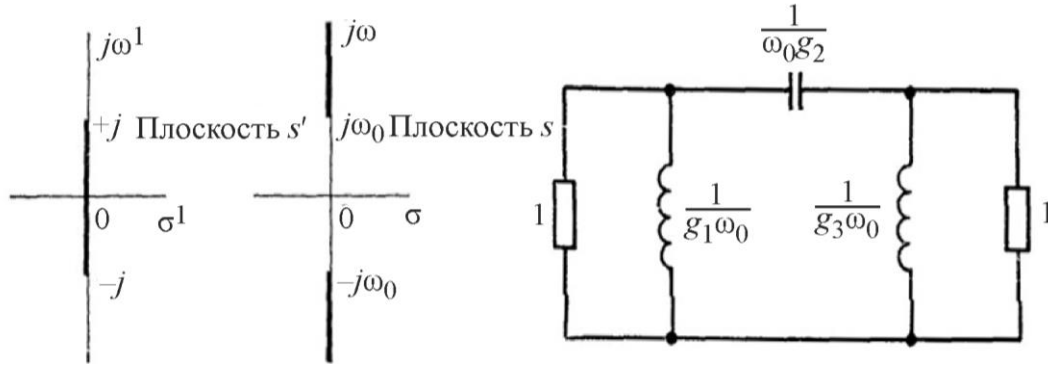


Рис. 1.6. Частотное преобразование ФНЧ \Rightarrow ФВЧ

Для ФВЧ замена частотной переменной $\Omega = -\frac{\omega_c}{\omega}$ эквивалентна перемещению 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. 1.6):

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

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

$$\Omega = \frac{1}{2\Delta\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

преобразует частотную характеристику ФНЧ-прототипа в АЧХ полосно-пропускающего фильтра, симметричную относительно центральной частоты ω_0 (рис. 1.7). Индуктивность в ФНЧ-прототипе после замены превращается в последовательный колебательный контур с элементами

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

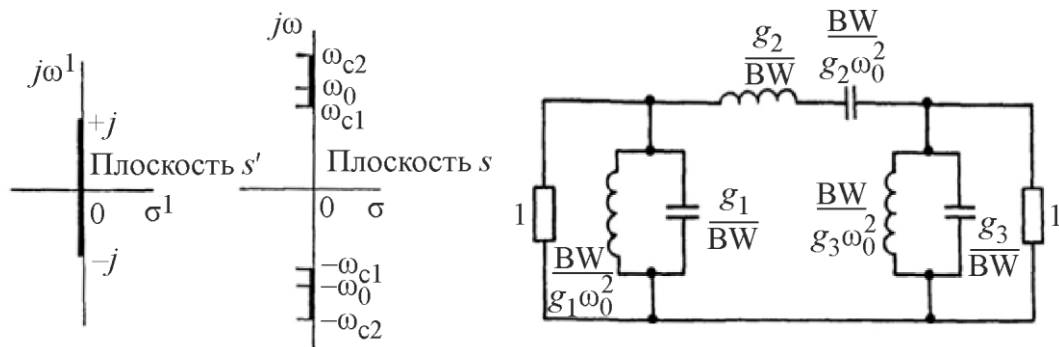


Рис. 1.7. Частотное преобразование ФНЧ \Rightarrow ППФ

Емкость прототипа превращается в параллельный колебательный контур с элементами

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

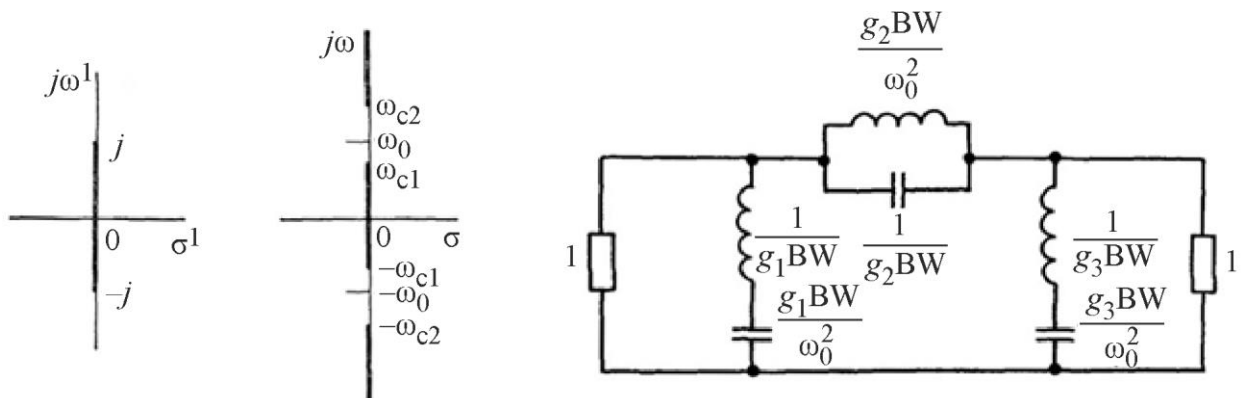


Рис. 1.8. Частотное преобразование ФНЧ \Rightarrow ПЗФ

Для ПЗФ осуществляется аналогичное преобразование, но в качестве прототипа используется фильтр высокой частоты (т. е. частотное преобразование осуществляют 2 раза: ФНЧ \Rightarrow ФВЧ \Rightarrow ПЗФ). При этом параллельные индуктивности исходного ФНЧ-прототипа преобразуются в последовательные контуры, последовательные емкости – в параллельные резонансные контуры (рис. 1.8).

1.2. Реализация микрополосковых фильтров СВЧ

При конструировании фильтра требуется заменить индуктивности и емкости схемы его прототипа реальными элементами. На относительно низких частотах удастся это сделать, используя квазисосредоточенные микрополосковые

индуктивности и конденсаторы. На более высоких частотах используют замену реактивных элементов схемы фильтра отрезками линий передачи. Их длины и волновые сопротивления подбирают так, чтобы в пределах полосы пропускания фильтра входной импеданс отрезка линии приблизительно соответствовал бы требуемому значению реактивности.

Рассмотрим реализацию ФНЧ, используемого в лабораторной работе. Он строится на основе чебышевского прототипа 7-го порядка (рис. 1.9, а).

Последовательные индуктивности в реальной конструкции фильтра реализованы отрезками линий длиной l с большим волновым сопротивлением $Z_1 \gg Z_0$ (рис. 1.10).

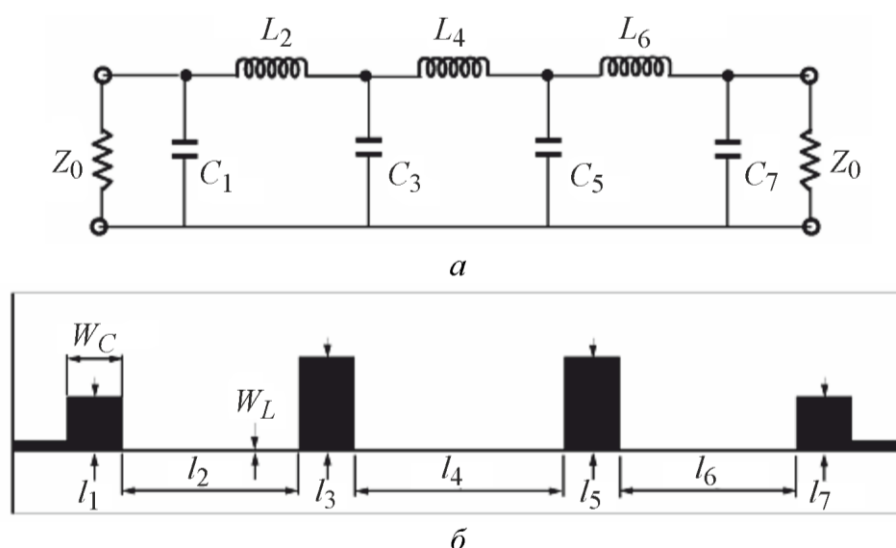


Рис. 1.9. Реализация ФНЧ с разомкнутыми шлейфами (open-ended stubs filter)

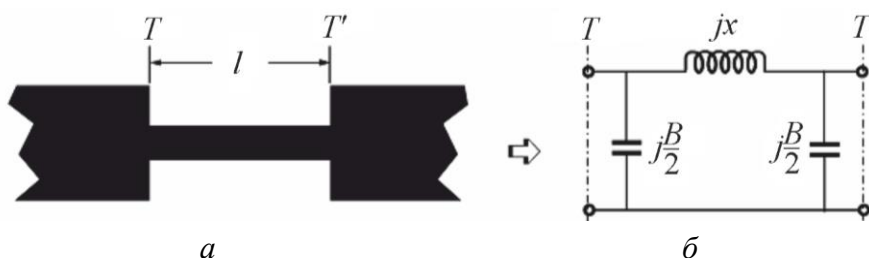


Рис. 1.10. Реализация последовательных индуктивностей в ФНЧ

Приближенно при $l \leq \frac{\Lambda}{8}$ индуктивность можно представить в виде $L = \frac{2\pi Z_1 l}{\omega \Lambda}$, где Λ – длина волны в линии.

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 ем-

кость разомкнутого шлейфа можно записать в виде $C = \frac{2\pi l}{\omega \Lambda Z_1}$. Отметим, что

при малой длине шлейфов такой элемент проще реализовать скачком волнового сопротивления основной микрополосковой линии (МПЛ) (рис. 1.11).

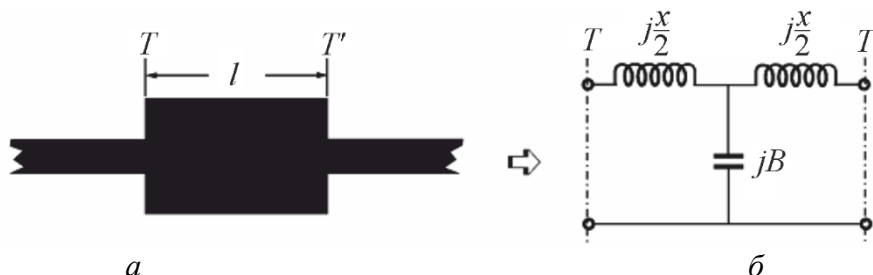


Рис. 1.11. Реализация параллельных емкостей в схеме ФНЧ

Он эквивалентен параллельной емкости, рассчитываемой по приближенной формуле $C = \frac{\Lambda l}{2\pi Z_1}$, где Z_1 – волновое сопротивление отрезка линии $\langle T - T' \rangle$

длиной l . ФНЧ с такой реализацией схемы прототипа представляет собой набор отрезков линий передачи с разным волновым сопротивлением.

Используемая в лабораторной работе реализация ФВЧ представляет собой 6 короткозамкнутых шлейфов, включенных в МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 1.12).

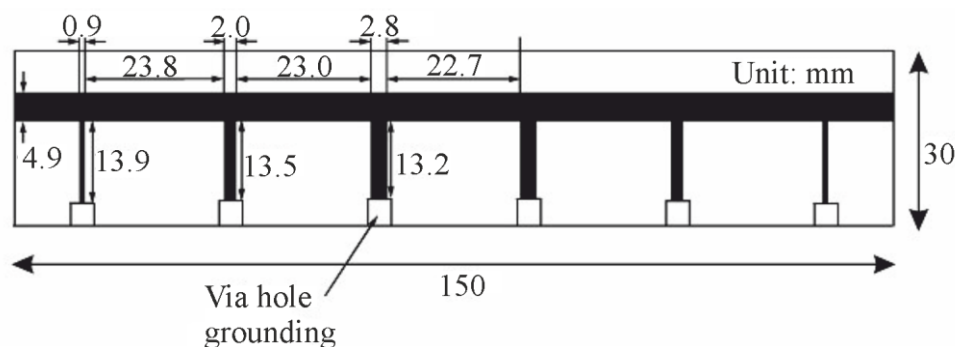


Рис. 1.12. ФВЧ на короткозамкнутых шлейфах (short-circuit stubs filter)

Расстояния между шлейфами выбраны практически одинаковыми, длины шлейфов примерно в 2 раза меньше. Реализация элементов схемы прототипа фильтра осуществляется подбором волновых сопротивлений шлейфов. Структура фильтра имеет периодический характер, поэтому АЧХ фильтра имеет повторяющиеся полосы заграждения в области высоких частот.

Для полосковых ППФ и ПЗФ часто используют четверть- и полуволновые резонаторы на отрезках МПЛ. Резонаторы соединяют либо непосредственно (например, через торцовые емкости), либо через отрезки связанных полосковых

линий. В лабораторной работе исследуется ППФ Чебышева 5-го порядка, включающий набор полуволновых резонаторов, свернутых в виде буквы «U» так, что они похожи на «шпильки для волос» (Hairpin). Подобные «шпилечные» конструкции обладают малыми габаритами как в длину, так и в ширину (рис. 1.13).

Резонаторы фильтра взаимодействуют между собой через отрезки связанных МПЛ. Подводящая линия подключается к крайним резонаторам на расстоянии от края так, чтобы обеспечить входное сопротивление фильтра 50 Ом. Типичная АЧХ такого фильтра представлена на рис. 1.14.

Для полосно-заграждающего фильтра удобно использовать конструкцию с разомкнутыми четвертьволновыми шлейфами (рис. 1.15).

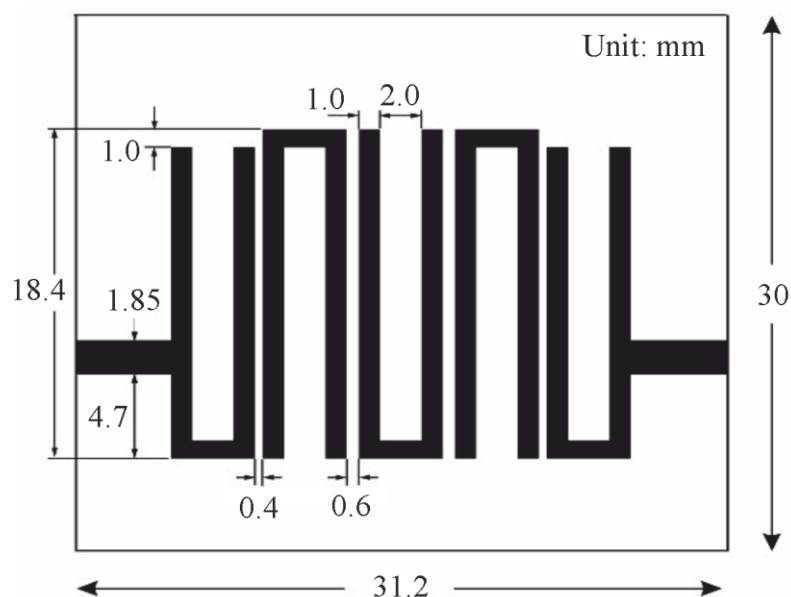


Рис. 1.13. ППФ шпилечного типа (Hairpin-line filter)

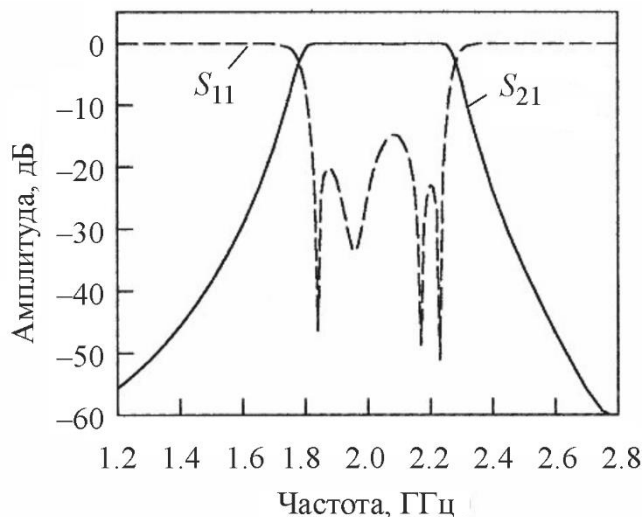


Рис. 1.14. АЧХ ППФ шпилечного типа

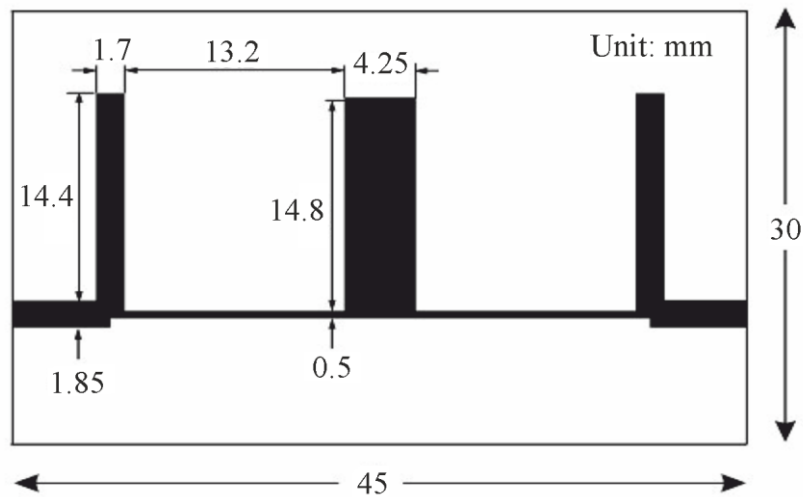


Рис. 1.15. ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

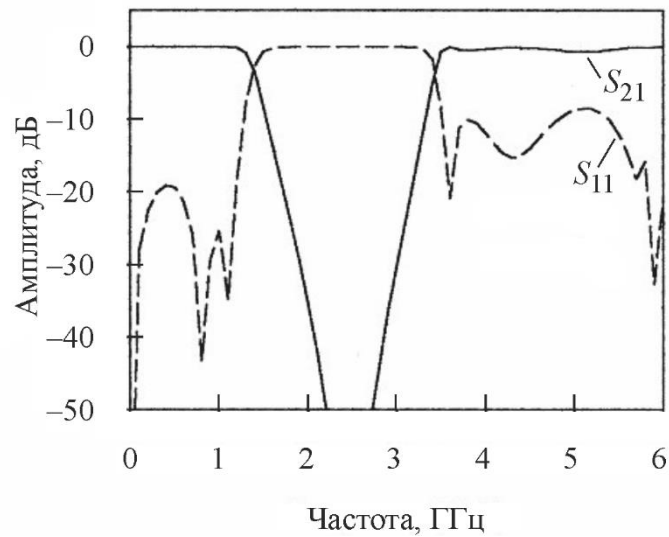


Рис. 1.16. АЧХ ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

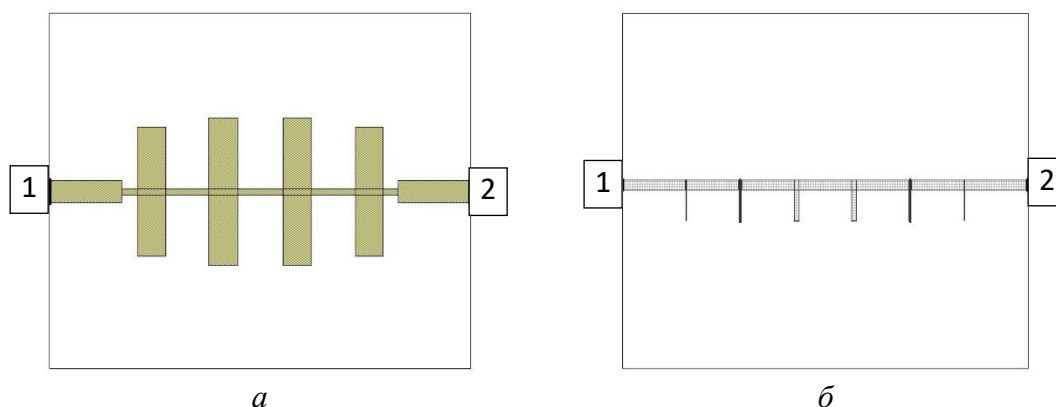
Шлейфы соединены между собой четвертьволновыми отрезками линии большего волнового сопротивления, чем у шлейфов. Примерная частотная характеристика такого фильтра приведена на рис. 1.16.

1.3. 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 фильтра. 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 уровню АЧХ.
3. Измерение АЧХ коэффициентов S_{11} и S_{21} в полном масштабе по уровню.
4. Использование режима электронных меток для определения параметров фильтра.
5. Измерение АЧХ в полосе пропускания (или заграждения) в крупном масштабе.
6. Сохранение полученных результатов в текстовом файле для дальнейшего использования в среде Microwave Office.

В лабораторной работе исследуются микрополосковые фильтры СВЧ четырех типов: ФНЧ – фильтр с разомкнутыми шлейфами; ФВЧ – фильтр с короткозамкнутыми (КЗ) шлейфами; ППФ – фильтр со связанными полуволновыми резонаторами типа Hairpin; ПЗФ – фильтр с полуволновыми шлейфами (рис. 1.17).



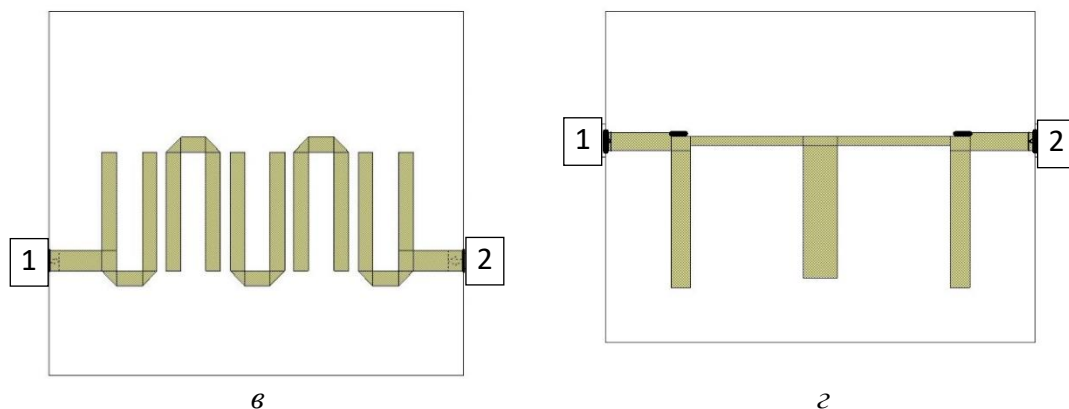


Рис. 1.17. Топология фильтров, исследуемых в лабораторной работе:

a – ФНЧ (LPF); *б* – ФВЧ (HPF); *в* – ППФ (BPF); *г* – ПЗФ (BSF)

Фильтры выполнены на подложке ПТФЭ (политетрафторэтилен, тефлон, фторопласт) и смонтированы в металлических корпусах с прозрачной крышкой. Входы фильтров снабжены переходами с МПЛ на разъем типа SMA-F. Анализатор цепей СВЧ Agilent E5062A соединен с фильтром короткими отрезками коаксиального кабеля.

В процессе работы исследуются два из четырех фильтров (по указанию преподавателя). Электромагнитное и схемотехническое моделирование и расчет характеристик фильтров осуществляются в среде компьютерного проектирования Microwave Office (MWO 10). Используются две модели фильтров: схемотехническая и электромагнитная. Для сравнения с экспериментальными результатами в среду MWO вводятся данные частотной характеристики, сохраненные в текстовом виде и вручную преобразованные в стандартный формат результатов измерения Touchstone.

1.4. Задание и указания к выполнению работы

1.4.1. Калибровка и подготовка прибора к работе

Для выполнения задания потребуется USB-накопитель, отформатированный в формате FAT, FAT32 или NTFS. Накопитель с файловой системой ExFAT не поддерживается операционной системой Windows 2000.

Подготовка прибора к работе:

1. Включите анализатор цепей E5062 и дождитесь загрузки программного обеспечения.

2. Установите полный рабочий диапазон 300 кГц ... 3 ГГц. Это можно сделать, например, указав ручную начальную и конечную частоту работы прибора (раздел приборной панели **Stimulus** / кнопки **Start, Stop**).

Расширенная калибровка прибора выполняется вместе с соединительными кабелями с помощью четырех образцовых элементов: меры XX (или открытого конца коаксиальной линии), короткозамыкателя (K3), согласованной нагрузки (CH) 50 Ом и соединителя – отрезка линии (используется переход F-F – Female-Female).

Для исследования АЧХ фильтров достаточно провести расширенную калибровку следующим образом:

1. Выберите тип калибровки **Calibration** => **Calibrate** => **Enhanced Response**. В меню **Calibration** можно также попасть нажатием кнопки **CAL** на передней панели прибора.

*В открывшемся меню будет предложено произвести калибровку с использованием 3 образцовых мер и соединения «на проход», так называемую **SOLT** калибровку (**S**hort **O**pen **L**oad **T**hru) и опциональную калибровку изоляции. Калибровка будет считаться завершенной тогда и только тогда, когда будет произведено 4 **SOLT** измерения и нажата кнопка **Done**.*

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 пассивно-

го (Port 2) каналов при помощи соединительного переходника F-F (*Female-Female*). Нагрузка **XX** представляет собой фрагмент разъёма с отсутствующим центральным контактом с открытой, либо глухой задней стенкой. **K3** имеет центральный проводник, закороченный на заднюю стенку. **Согласованная нагрузка** имеет центральный проводник, изолированный от внешнего и некий объём, необходимый для расположения самой нагрузки и отвода заданной тепловой мощности, часто можно увидеть маркировку с указанием сопротивления 50 Ом. Соединительный **переходник Female-Female** представляет собой два ответных разъёма, зеркально соединённых вместе и используется для соединения между собой, или наращивания 2 одностипных кабелей. Также такой переходник часто называют «бочонок».

2. Подключите через кабель и соединитель F-F нагрузку **XX** к измерительному порту 1 (можно использовать открытый конец соединителя F-F при отсутствии нагрузки **XX**). Нажмите **Open**.

3. Подключите нагрузку **K3** и нажмите **Short**. Отключите нагрузку **K3**.

4. Подключите согласованную нагрузку к порту и нажмите **Load**.

5. Соедините активный и пассивный порты при помощи переходника типа F-F и нажмите кнопку **Thru**.

6. Если все предыдущие пункты SOLT калибровки произведены успешно и появились 4 галочки на соответствующих кнопках, нажмите **Done**.

7. Вернитесь в главное меню нажатием кнопки **Return**. Отключите соединитель F-F и положите все элементы калибровочного набора в коробку.

В заключение проверьте, включена ли калибровка (подменю **Calibrate/Correction => ON**) для всех каналов, если используется несколько каналов измерения. Для переключения каналов используйте кнопку **Channel Next**. Прибор готов для измерений в полном частотном диапазоне.

1.4.2. Установка оптимального частотного диапазона для исследования фильтров и измерение их АЧХ

1. Подключите исследуемый фильтр к портам прибора.

2. Установите число отображаемых графиков (**Display => Number of Traces**) равным 3, формат вывода графиков на экран – один над другим (**Display =>**

Allocate Traces => выбрать из списка необходимый способ отображения – один над другим) (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Варианты расположения графиков

Для переключения между параметрами можно пользоваться клавишами на лицевой панели прибора **Trace Next** (следующий график), **Trace Prev** (предыдущий график), кнопками экранного меню или щелчком мыши на окне требуемого графика.

3. Выведите в первом окне две АЧХ (модули S_{21} и S_{11}) в логарифмическом масштабе, во втором – зависимость КСВН (VSWR) от частоты. В первом окне количество графиков (traces) – 2, измеряемые параметры – S_{21} и S_{11} , формат отображения – логарифмический [дБ], во втором канале количество графиков будет 1, режим измерения – S_{11} , формат – коэффициент стоячей волны (VSWR).

Для выбора измеряемого параметра необходимо:

- выбрать активный график (клавишами или мышью);
- нажать **Measurement**;
- выбрать требуемый параметр матрицы рассеяния (S_{11} или S_{21}).

Для выбора формата отображения необходимо:

- указать активный график (кнопками или мышью);
- нажать **Format** и с помощью программируемой клавиши выбрать требуемый формат вывода данных **Log Mag** (прямоугольная система координат, логарифмическая шкала) или **SWR** (прямоугольная система координат, КСВН).

4. Установите удобный масштаб по вертикали в режиме автоподстройки, для чего необходимо:

- выбрать требуемый 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**), удобно использовать 10 делений;
- цену деления (**Scale/Div**) масштабной сетки по оси Y активного графика;

- положение опорного уровня (**Reference Position**) активного графика (укажите номер деления шкалы опорного уровня);
- значение опорного уровня (**Reference Value**).

В обоих окнах должны получиться графики АЧХ фильтра в полном частотном диапазоне.

Для получения более удобного масштаба по частоте выберите начальную и конечную частоту. Для полосовых фильтров это частоты, соответствующие ширине полосы пропускания по графику модуля S_{21} по уровню $-40 \dots -60$ дБ. Для других фильтров удобно ограничить полосу обзора до уровня $-20 \dots -30$ дБ в полосе задерживания и до 100 МГц в полосе пропускания. Наглядно выбор диапазона частот отображен на рис 1.19 на примере ФНЧ и ПЗФ фильтров.

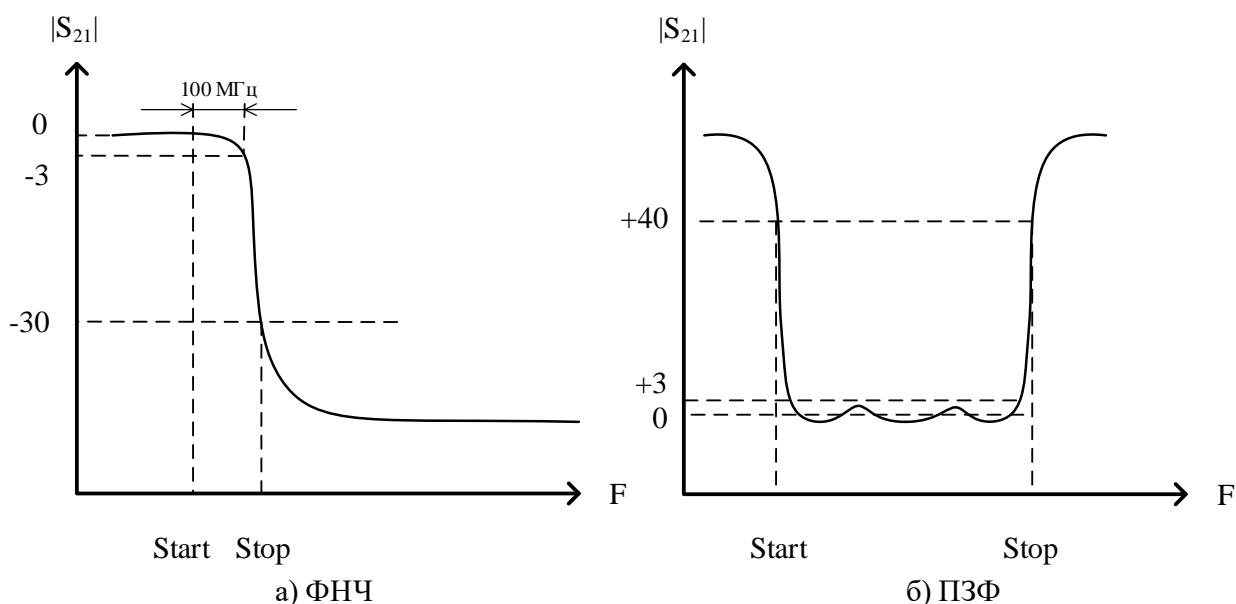


Рис. 1.19. Выбор оптимальной полосы обзора.

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 (полосу обзора) относительно центральной частоты. То же самое можно сделать в пункте меню **Display => Frequency**.


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

- выбрать требуемые канал и график;
- нажать кнопку **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 изменен 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)**.

5. После того как изображение требуемых АЧХ получено на экране в удобном масштабе, его необходимо сохранить в графическом и численном виде. Сохраните изображение экрана в виде графического файла формата .BMP (256 color) следующим образом:

- выберите вид изображения – с белым фоном (**System => Invert Image => On**). Это удобно для дальнейшей распечатки «снимка экрана» в отчет;
- для записи снимка в файл нажмите кнопку **Dump Screen Image**. Имя файла и его расположение укажите в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени осуществляют с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой **Input from the front panel**. Нажмите кнопку **Save** для выполнения операции сохранения.



6. Выведите численные данные по каждому графику (модули S_{21} и S_{11}) 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;
 - 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 в ходе подготовки отчета их надо будет вручную свести в один файл в формате s2p (формат Touchstone). Процедура обработки данных описана в 1.4.5.

1.4.3. Измерение параметров полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров с помощью программного обеспечения анализатора E5062

Включите режим измерения параметров ППФ или ПЗФ способом, указанным далее. Он позволяет найти полосу пропускания (**BW**), центральную частоту (**cent**) и точки отсечки (**high** – верхняя частота отсечки и **low** – нижняя частота отсечки), добротность (**Q**) и вносимые потери (**loss**) в точке активного маркера. Поиск ведется относительно уровня маркера. Определение параметров, используемых при поиске полосы на примере ППФ, приведено на рис. 1.20.

Для реализации режима поиска полосы ППФ, ПЗФ по вносимому ослаблению (S_{21}) необходимо:

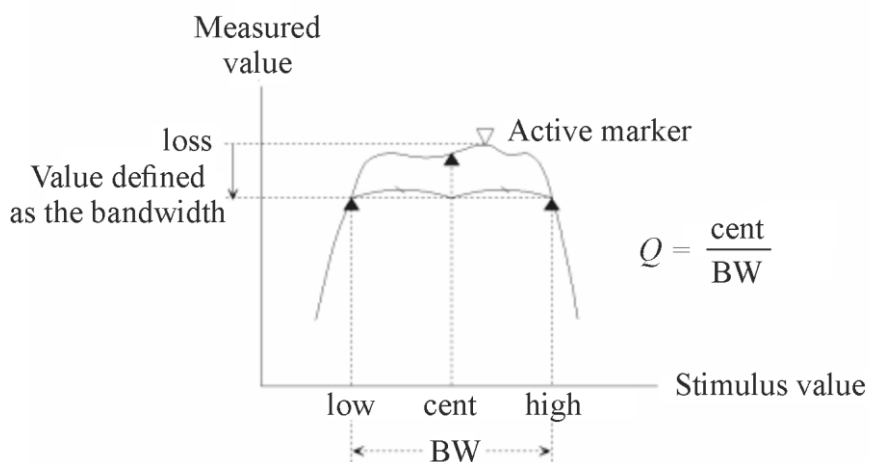


Рис. 1.20. Параметры полосы пропускания ППФ

1. Поместить активный маркер в точку максимума на графике. Для этого необходимо нажать клавишу **Marker Search** и установить маркер в максимум АЧХ кнопкой **Max** для ППФ и **Min** для ПЗФ.


2. Установить уровень, по которому отсчитывается полоса **Bandwidth Value** (по умолчанию используется уровень -3 дБ). Обратите внимание, что для ППФ нужно использовать уровень < 0 , а для ПЗФ > 0 .

3. Выбрать переключатель **Bandwidth** => **ON**. В левой верхней части поля графика на экране отобразятся шесть параметров фильтра.

4. Установите удобный масштаб изображения по частоте, изменяя начальную и конечную частоту обзора.

4. Запишите полученные результаты в протокол измерений и сохраните

изображение экрана в файл .BMP. 

5. Выведите численные данные по каждому графику (модули S_{21} и S_{11}) в текстовые файлы типа .CSV. 

6. В ходе подготовки отчета преобразуйте данные файлов .CSV в формат .S2P (формат Touchstone). Процедура обработки данных описана в п. 1.4.5.

7. Измерьте параметры фильтра по заданному уровню KCBH:
- перейдите к графику KCBH;
 - найдите минимум KCBH в рабочей полосе частот **Marker Search** => **Min**;
 - задайте уровень превышения KCBH на границах рабочей полосы (например, **Bandwidth Value** = 1, что соответствует граничному значению KCBH = 2);
 - включите режим поиска полосы **Bandwidth** => **ON**;
 - запишите полученные результаты.

1.4.4. Измерение параметров фильтров нижних и верхний частот


Измерение параметров ФНЧ или ФВЧ при помощи поиска полосы **Bandwidth** не работает. В связи с чем измерение нужно производить вручную при помощи маркеров.


1. Поместите опорный маркер (**Ref Marker**) в точку максимума на графике АЧХ. Для этого необходимо нажать клавишу **Marker Search** и установить маркер в максимум АЧХ кнопкой **Max**. Также можно установить маркер в точку максимума вручную при помощи колеса, или мыши.

2. Если у исследуемого фильтра в полосе пропускания наблюдаются значительные пульсации АЧХ, то положение маркера следует слегка скорректировать до достижения уровня ослабления равному среднему ослаблению в полосе пропускания.

3. Активируйте маркер 1 и переместите его на частоту среза по уровню – 3 дБ. Данные по 1 маркеру должны отображаться относительно опорного.

4. Рассчитайте и запишите в протокол измерений абсолютные значения частоты среза, вносимого затухания в полосе пропускания, затухание в полосе задерживания. Также запишите тип используемого фильтра.

5. Сохраните изображение экрана в файл .BMP. 

6. Выведите численные данные по каждому графику (модули S_{21} и S_{11}) в текстовые файлы типа .CSV. 

7. В ходе подготовки отчета преобразуйте данные файлов .CSV в формат .S2P (формат Touchstone). Процедура обработки данных описана в п. 1.4.5.

1.4.5. Преобразование данных измерения в формат Touchstone

Touchstone – это один из наиболее популярных форматов файлов, используемый для обмена информацией между измерительной аппаратурой и системами компьютерного моделирования (файл в формате SnP). Он представляет собой текстовый файл, в котором содержатся результаты измерения или расчета частотных характеристик 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:

1. Это текстовый файл, содержащий строки в кодировке US-ASCII.
2. Расширение файла .snp, где n – количество портов в устройстве (например, файл данных частотных характеристик четырехполюсника имеет расширение .s2p).

3. Строки комментариев отмечены знаком (!). Комментарии могут содержать информацию о модели измерительного прибора, объекте измерения, дате и условиях проведения измерения.

4. 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 единицы измерения частоты Hz, MHz, GHz. Второе слово – обозначение параметра (S – матрица рассеяния, Z – матрица сопротивлений и пр.), третье и четвертое – формат вывода (MA – модуль и аргумент в градусах, DB – модуль в децибелах и аргумент в градусах, RI – вещественная и мнимая части параметра). Послед-

ние два слова – R и число – указывают нормирующее волновое сопротивление портов в омах (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 S_{21} расположен левее параметра S_{12} . 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 четырехполюсника 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

3.0000 0.3419 0.3336 -0.0134 0.0379 -0.0134 0.0379 0.3419 0.3336

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 текстовом формате CSV.

Для объединения данных можно использовать Microsoft Excel. Примерная схема операции ручного создания файла в формате Touchstone:

1. Загрузите файл Touchstone.xls – он содержит заголовок **# Hz S DB R 50**. Можно ввести такой заголовок в новую книгу Excel и вручную.

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 вторую строку.

4. Используйте команду импорта текстовых данных Excel.

Для версии 2019: **Данные => Получить данные => Устаревшие мастера => Из текста (прежних версий)**.

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 S_{11} . Режим импорта – с разделителем, импорт с 4-й строки, разделитель – запятая, формат данных *всех* столбцов – текстовый, разделитель целой и дробной части (в разделе **Подробнее**) – точка («.»). Нажмите кнопку **Готово**.

5. Установите курсор на 4-й столбец 2-й строки. Аналогично импортируйте данные коэффициента S_{21} . Первый столбец (частоту) при этом не экспортируйте (**Формат данных столбца => пропустить столбец**).

6. Для завершения структуры файла необходимо добавить данные S_{12} и S_{22} , которые не измерялись. Заполните недостающую часть таблицы имеющимися данными S_{11} и S_{21} . Можно повторно импортировать данные из файлов или просто скопировать столбцы 4, 5 в столбцы 6, 7, а столбцы 2, 3 – в столбцы 8, 9.

7. Сохраните полученный файл в текстовом виде .TXT (разделитель – табулятор) и затем переименуйте его расширение в .S2P.

8. В таком виде файл готов к загрузке в программу Microwave Office.

1.4.5. Компьютерное моделирование фильтров и сравнение результатов с данными эксперимента

В программе лабораторной работы предусмотрено два варианта моделирования исследуемых фильтров – электродинамическое (с использованием планарных моделей полосковых элементов EMSight) и схемотехническое. Файлы проектов моделирования называются **XXX_EM0.emp** и **XXX_Schem0.emp**, где XXX – название типа фильтра (LPF, HPF, BPF или BSF). В проектах представлены готовые EM structures для всех типов фильтров, а также схемотехническое их представление в виде микрополосковых элементов. Размеры и свойства элементов соответствуют исследуемым фильтрам и не требуют корректировки.

Задачи расчетной части работы:

1. Рассчитать модели фильтра в оптимальном для фильтра частотном диапазоне (в котором проводились измерения).

2. Построить графики частотных характеристик элементов матрицы рассеяния и КСВ. Отдельно построить графики ослабления и КСВ в полосе пропускания (или в полосе запираания для ПЗФ).

3. Сравнить результаты электромагнитного и схемотехнического моделирования на одном графике. Для этого надо вывести данные электромагнитного моделирования в файл (Output File) типа s2p и внести эти данные в схемотехническую модель.

4. В проект схемотехнического моделирования ввести данные измерений из заранее подготовленного файла формата s2p и построить их на одном графике с расчетными характеристиками.

5. Полученные графики сохранить и поместить в отчет по лабораторной работе.

1.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки;
- таблицы с результатами измерений параметров фильтров;
- графики измеренных частотных зависимостей фильтров;
- сохраненные графики измеренных зависимостей в формате .BMP;
- графики результатов моделирования фильтров в среде MWO в сравнении с измеренными данными;
- выводы о точности проведенных измерений, а также о соответствии результатов измерений и моделирования фильтров.

1.6. Контрольные вопросы

1. Какие типы фильтров используют в технике СВЧ? Какими параметрами описывают АЧХ фильтров ППФ и ПЗФ?
2. Поясните принцип синтеза СВЧ фильтров через НЧ прототипы.
3. Как из НЧ прототипа фильтра НЧ получают прототипы ФВЧ, ППФ, ПЗФ?
4. Из каких соображений выбирают вид АЧХ фильтра: Баттерворта, Чебышева или Кауэра?
5. Как реализуют расчетные схемы фильтров на СВЧ в микрополосковом исполнении?
6. Как устроен СВЧ ППФ «шпилечного» типа?
7. Какие функциональные возможности анализатора цепей СВЧ E5062A целесообразно использовать для определения полосы пропускания, вносимого затухания и добротности фильтров?
8. Какой режим прибора E5062 используют для определения параметров ППФ? Какие параметры фильтра в этом режиме измеряют?
9. Какой специализированный режим измерения параметров ФНЧ (радиофильтра) предусмотрен в программном обеспечении прибора E5062?
10. Пояснить наиболее часто используемые критерии определения полосы пропускания фильтров СВЧ. Как определить полосу пропускания фильтра с большим уровнем пульсаций (в полосе пропускания)? Как измерить уровень пульсаций?
11. Как связаны модуль коэффициента пропускания и отражения фильтров СВЧ? Существует ли полоса заграждения у полосно-пропускающего фильтра?
12. Что такое «формат файлов данных Touchstone»? Для чего используют такие файлы?
13. Какие типы разъёмов используют в ВАЦ? Для чего к разъёмам ВАЦ подсоединяют адаптеры - повторители с выходом того же типа?

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. Воскресенский Д.,М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ: лаб. Практикум /Под. ред. А.А. Данилина.- СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.
5. Лавренко Ю.Е., Грачев С.В. Устройства СВЧ: конспект лекций. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с
6. Хелзайн Пассивные и активные цепи СВЧ. –М.: Радио и связь, 1981.- 200с.
7. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях.
8. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
9. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988-280с.
- 10.Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.

Оглавление

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ СВЧ	2
1.1. Общие сведения о фильтрах СВЧ-диапазона	2
1.2. Реализация микрополосковых фильтров СВЧ	8
1.3. Описание лабораторной установки	13
1.4. Задание и указания к выполнению работы	15
1.4.1. Калибровка и подготовка прибора к работе	15
1.4.2. Установка оптимального частотного диапазона для исследования фильтров и измерение их АЧХ	16
1.4.3. Измерение параметров полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров с помощью программного обеспечения анализатора E5062	20
1.4.4. Измерение параметров фильтров нижних и верхний частот	21
1.4.5. Преобразование данных измерения в формат Touchstone	22
1.4.5. Компьютерное моделирование фильтров и сравнение результатов с данными эксперимента	24
1.5. Содержание отчета	25
1.6. Контрольные вопросы	26
Литература	27