

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

« 19 » января 2022 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

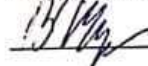
**РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА МАКЕТА
ТРЕХЗВЕННОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА НА
РЕЗОНАТОРАХ СО СКАЧКОМ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА
ЧАСТОТУ 1,7 ГГц**

по основной образовательной программе подготовки специалиста
по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Корнилов Алексей Андреевич

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук, доцент

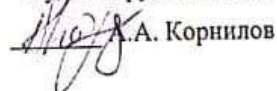


В.А. Журавлев

« ____ » января 2022 г.

Автор работы

студент группы № 768



А.А. Корнилов

Томск-2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

« 25 » декабря 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на подготовку ВКР специалиста
студенту Корнилову Алексею Андреевичу группы № 768

1. Тема ВКР: Разработка, изготовление и настройка макета трехзвенного микрополоскового фильтра на резонаторах со скачком волнового сопротивления на частоту 1,7 ГГц.

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- а) на кафедре 19.01.2022,
- б) в ГЭК 01.02.2022.

3. Краткое содержание работы:

Работа включает в себя виртуальное моделирование, изготовление макета фильтра. Объектом работы является модель макета трехзвенного микрополоскового фильтра

4. Техническое задание на конструирование:

Центральная частота полосы пропускания $f_0 = 1.7 \pm 0.03$ ГГц;
Относительная ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ $\Delta f/f_0 = (12 \pm 0.1) \%$;
Уровень максимумов потерь на отражение в полосе пропускания -14 дБ;

Параметры конструкции:

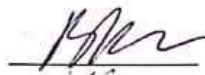
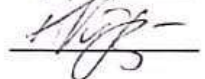
- 1. Диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 16.5$.
- 2. Толщина подложки $H = 2$ мм.
- 3. Ширина внешних полосковых проводников: $W = 4$ мм.
- 4. Ширина внутренних полосковых проводников: $W = 2$ мм.
- 5. Кондуктивное подключение: линии 50 Ом длиной 5 мм
- 6. Длина «перемычки» от линии до резонатора $L_i = 2$ мм.
- 7. Волновое сопротивление «перемычки» $Z_i = 150$ Ом.

5. Календарный график выполнения ВКР:

- | | |
|---|-------------------------|
| а) оформление литературного обзора | 25.12.2021 – 27.12.2021 |
| б) подготовка презентации к защите | 10.01.2022 – 15.01.2022 |
| в) написание ВКР и сдача в ГЭК | 16.01.2022 – 17.01.2022 |
| г) размещение текста ВКР в электронной библиотеке ТГУ | 18.01.2022 – 01.02.2022 |

6. Дата выдачи задания «25» декабря 2021 г.

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры
радиоэлектроники
Задание принял к исполнению

В.А. Журавлёв

А.А. Корнилов

АННОТАЦИЯ

Отчет 50 с., 34 рис., 10 табл., 6 источников.

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ, АЧХ, «СКАЛЬПЕЛЬ 96», НАСТРОЙКА ТРЕХЗВЕННОГО ФИЛЬТРА с СВС.

Объектом работы является макет трехзвенного микрополоскового фильтра.

Цель работы – моделирование, разработка и настройка трехзвенного микрополоскового фильтра с СВС по ТЗ.

Задачи работы:

- 1) Обзор литературы;
- 2) Моделирование в Microwave office;
- 3) Изготовление макета фильтра и его настройка;
- 4) Оформление отчета по преддипломной работе.

Метод проведения работы – моделирование фильтра на ПК с помощью специального ПО, изготовление макета фильтра и его настройка.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 Понятие фильтра	8
1.1 Требования, предъявляемые к устройству фильтров.....	8
1.2 Классификация электрических фильтров	8
2 Микрополосковые фильтры	9
2.1 Простейшие микрополосковые резонаторы	9
2.2 Добротность микрополоскового резонатора	14
2.3 Микрополосковый резонатор с СВЧ	14
2.4 Влияние СВЧ на спектр частот и размеры МПР	16
2.5 Настройка трехзвенного микрополоскового фильтра	21
3 Работа в программе «Скальпель 96»	24
3.1 Настройка резачка	24
3.2 Изготовление резачка.....	25
4 Microwave office(Микроволновый офис)	26
5 Практическая часть	30
5.1 Техническое задание	30
5.2 Моделирования АЧХ фильтра в AWR и его настройка	31
5.3 Последовательность изготовления макета фильтра.....	33
5.4 Координаты для вырезания на установке «Скальпель-96».....	34
5.5 Этапы настройки фильтра.....	35
Вывод по сравнению	44
6 Обеспечение безопасности труда и охраны здоровья.....	45
6.1 Общие требования охраны труда.....	45
6.2 Требования охраны труда перед началом работ	45
6.3 Требования охраны труда вовремя работы	46
6.4 Требования охраны труда в аварийных ситуациях	47
6.5 Требования охраны по окончанию работы	48
Заключение	49
Список использованных источников.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные и электрические управляемые устройства сверхвысоких частот являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем. Существует множество диапазонов частот, на которых производится радиосвязь. Фильтр осуществляет работу устройства на необходимой частоте. Они используются в системе связи, радиолокационных станций, в измерительной и специальной радиоаппаратуре.

В современном мире существуют два миниатюрных фильтра, которые получили широкое распространение в техники. Первый тип миниатюрных фильтров, используемых в технике, являются фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ). К их достоинствам относятся миниатюрность, высокая технологичность и низкая стоимость при массовом производстве. Эти достоинства реализуются на низких частотах, включая метровый диапазон волн. Недостатками фильтров на ПАВ являются высокие вносимые потери, потребность в дорогих пьезоэлектрических материалах, необходимость фотолитографии высокого разрешения. Фильтры на ПАВ допускают возможность электронной перестройки рабочей частоты на несколько десятых долей процента. Изготовление фильтров на ПАВ для дециметрового диапазона сталкивается с проблемой электронной литографии высокого разрешения, а также с возрастанием вносимых потерь. Поэтому применение фильтров на ПАВ в дециметровом диапазоне волн очень ограничено и возможно лишь до частот 1,5 ГГц.

К второму из них относятся фильтры на микрополосковых резонаторах, которые оказались лучшими в сантиметровом диапазоне волн. Достоинствами этого фильтра является сравнительно малые размеры и небольшие вносимые потери. Основными недостатками фильтров на ДР считаются сложность борьбы с близко расположенными паразитными резонансами и поштучная настройка каждого фильтра, это вызывает большие неудобства при массовом производстве. Микрополосковые селективные устройства, изготовленные на поликоровых подложках, достаточно широко применяются в технике СВЧ благодаря простоте и технологичности их изготовления. Селективные свойства фильтра можно заметно улучшить, если на его АЧХ сформировать полюсы затухания вблизи полосы пропускания. В микрополосковых фильтрах количество полюсов затухания и их положение на АЧХ зависит от степени кондуктивного подключения резонаторов к линиям передачи, от длины области связи МПР друг с другом и от других параметров МПФ. При конструировании микрополосковых фильтров с заданными АЧХ необходимо знать закономерности при изменении тех или иных параметров МПФ.

Данная работа посвящена исследованию амплитудно-частотных характеристик трехзвенных микрополосковых фильтров, кондуктивно подключенных к линиям передачи.

1 Понятие фильтра

Электрическим фильтром называют устройство, устанавливаемый между источником питания и нагрузкой, для пропускания желательных компонентов спектра электрического сигнала одних частот (с малым затуханием) и подавления электрических сигналов других частот (с большим затуханием).

Полосой затухания называют диапазон частот, которые пропускаются фильтром с большим затуханием, т.е. практически не пропускаются. Качественные фильтры могут задерживать до 99 % сигнала, если мощность сигнала не превышает заявленные характеристики фильтра. Если частоты пропускаются без затухания, их диапазон называется полосой пропускания [1].

1.1 Требования, предъявляемые к фильтрам

К разрабатываемому устройству предъявляются следующие требования:

- Миниатюрность;
- Технологичность в производстве;
- Низкая стоимость;
- Высокие электрические характеристики.

1.2 Классификация электрических фильтров

Типы фильтров:

– фильтры низких частот (ФНЧ). Пропускают частоты от нуля до частоты среза. Конструкция имеет вид: параллельное размещение емкости и последовательное расположение индуктивности.

– фильтры верхних частот (ФВЧ). Пропускают частоты от частоты среза до бесконечности. Конструкция имеет вид: параллельное подключение индуктивности и последовательное расположение емкости.

– полосно-пропускающие фильтры (ППФ). Пропускают определенный диапазон частот. Конструкция их может быть, как совокупность низкочастотных и высокочастотных фильтров, включенные каскадно.

– полосно-задерживающие фильтры (ПЗФ). Не пропускают только определенные частоты, а все остальное пропускают. Конструкция его состоит из высокочастотных и низкочастотных фильтров.

– Комбинированные. Комбинация нескольких электрофильтров.

В качестве пассивных фильтров низких и высоких частот могут использоваться RC цепь LR цепь.

2 Микрополосковые фильтры

Микрополосковые фильтры получили достаточно широкое распространение в аппаратуре СВЧ за счет таких преимуществ как высокие селективные свойства, миниатюрность, простота изготовления.

2.1 Простейшие микрополосковые резонаторы

Простейшим микрополосковым фильтром может служить одиночный микрополосковый резонатор. Он представляет собой отрезок регулярной микрополосковой линии (МПЛ) (рисунок 1) передачи открытого типа состоящий из двух плоских металлических проводников, выполненных в виде полоскового проводника 1 и экрана 2 на обеих сторонах подложки 3 с диэлектрической проницаемостью ϵ и высотой H [1].

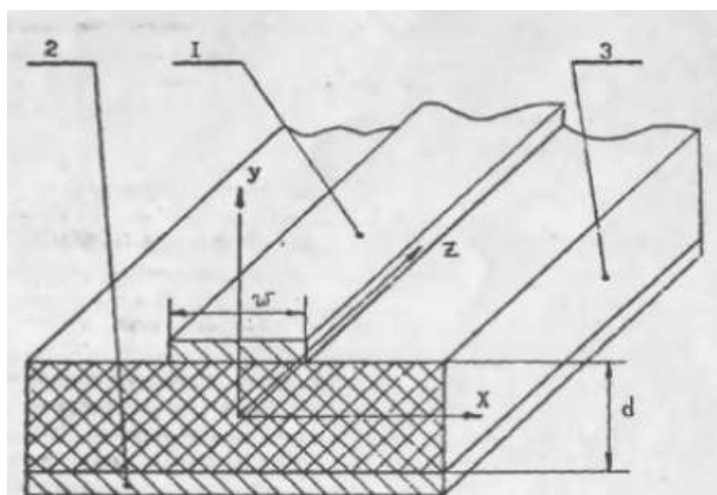


Рисунок 1 – Структура микрополоскового фильтра [1]

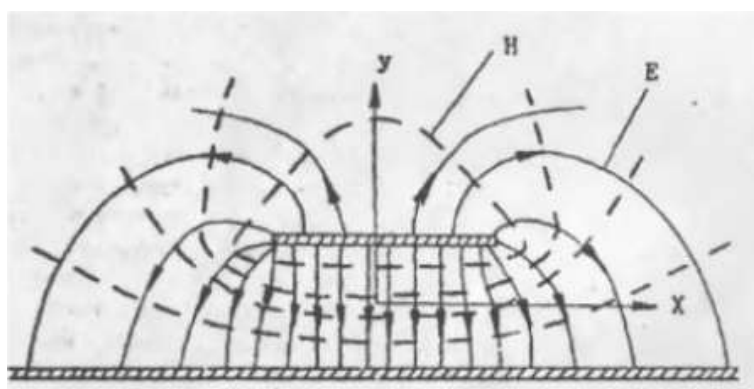


Рисунок 2 – МПЛ и структура поля в ней [1]

Распределение амплитуд высокочастотных магнитного поля и электрического поля показано на рисунке 4. Теоретический анализ поля в МПЛ усложняется тем, что лишь часть поля концентрируется в заполненном диэлектриком промежутке между полоской и заземленным проводником. Остальная часть поля, сосредоточена вблизи полоскового проводника и в воздухе над ним. В связи с этим распространяющаяся в линии мода является не чистой поперечной волной, а квазипоперечной волной. Квазипоперечная электромагнитная волна, представляет собой волну, у которой существуют продольные составляющие электромагнитного поля, однако они намного меньше поперечных составляющих. С помощью термина «квазипоперечная» подчеркивается, что различие в структуре полей, обусловленное присутствием в линии слоистой среды воздуха ($\epsilon = 1$) – диэлектрика ($\epsilon \neq 1$), для этих двух мод достаточно невелико. На низких частотах анализ, выполненный в предположении, что распространяется квазипоперечная мода, дает вполне приемлемую точность, однако по мере повышения частоты все более заметными становятся продольные составляющие полей. В частности, заметно проявляется дисперсия волнового сопротивления линии и эффективной диэлектрической проницаемости подложки – эти характеристики МПЛ начинают зависеть от частоты. Величина продольных составляющих возрастает также и с увеличением толщины подложки или ширины полоскового проводника [1].

Продольными составляющими полей по сравнению с поперечными можно пренебречь в том случае, когда толщина подложки H и ширина полоскового проводника W много меньше длины поперечной волны в диэлектрике. При нулевой толщине полоскового проводника, в квазистатической области частот с приемлемой точностью можно использовать следующие формулы для вычисления основных характеристик микрополосковой линии [1]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{\text{эф}}$ - эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ, c – скорость света в вакууме, v – фазовая скорость волны.

Диэлектрическая проницаемость в бесконечно тонкой линии равна:

$$\epsilon_{\text{эф}} = \frac{1}{2}(\epsilon + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon - 1) \times P, \quad (2)$$

где

$$P = \begin{cases} (1 + 12H/W)^{-1/2}, & W \geq H \\ (1 + 12H/W)^{-1/2} + 0,04(1 - W/H)^2, & W < H. \end{cases} \quad (3)$$

В приведенных уравнениях величина H является толщиной подложки, а величина W – шириной полоски, ϵ – диэлектрической проницаемостью подложки [1].

Построенные по формулам (1) – (3) нормированные зависимости $\epsilon_{\text{эф}}/\epsilon$ от относительной ширины полоскового проводника для трех широко распространенных в технике СВЧ материалов подложек $\epsilon = 2,8$ (ФЛАН), $\epsilon = 9,8$ (керамика поликор) и $\epsilon = 80$ (керамика ТБНС) приведены на рисунке 3.

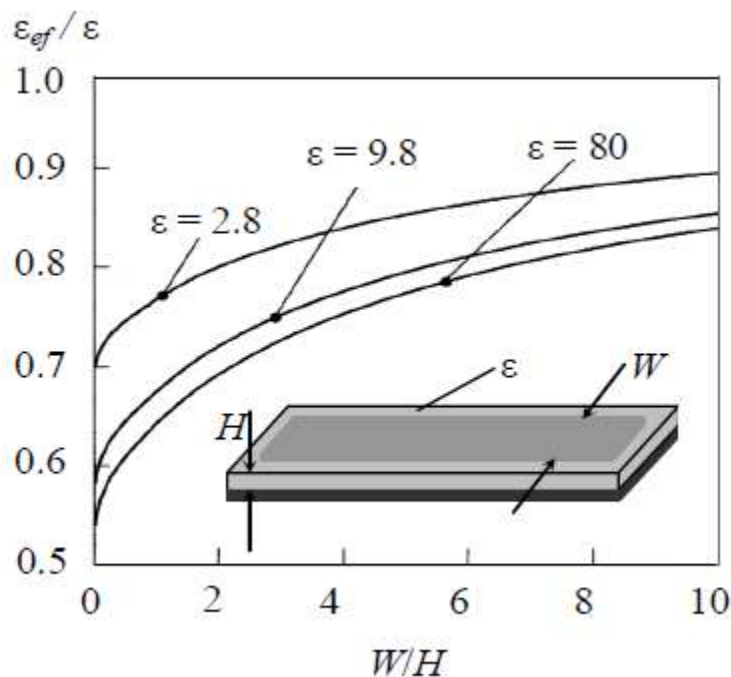


Рисунок 3 – Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ширины полоскового проводника [2]

Диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости при варьировании W сравнительно большой для всех подложек. Так, например, микрополосковая линия на подложке толщиной $H = 1$ мм, изготовленной из керамики ТБНС ($\epsilon = 80$), обладает $\epsilon_{\text{эф}} \approx 45$ при $W = 0,1$ мм и $\epsilon_{\text{эф}} \approx 67$ при $W = 10$ мм.

Волновое сопротивление отрезка микрополосковой линии может быть вычислено по следующим формулам:

$$Z = \frac{\frac{120}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}}{\left(\frac{H}{W}\right) + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1,444\right)} \text{ при } W \geq H \quad (4)$$

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \ln\left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H}\right) \text{ при } W \leq H. \quad (5)$$

Фазовой скоростью от частоты можно пренебречь при низких частотах для основных типов волн в МПЛ. Они различаются тем, что при продольных модах колебаний электрические токи текут вдоль резонатора, а при поперечных – поперек. Смешанные моды колебаний представляют собой комбинацию связанных продольных и поперечных колебаний. В МПЛ продольные моды колебаний свойственны только поперечным и квазипоперечным волнам. Поперечные и смешанные моды колебаний характерны для волны высших типов, которые возникают на высоких частотах, когда по ширине полоскового проводника укладывается несколько длин полуволн.

При продольных колебаниях амплитуды высокочастотного электромагнитного поля между полосковым проводником и экраном однородны в поперечном сечении резонатора. Высокочастотное напряжение U и интегральный по сечению полоскового проводника электрический ток I распределяются по длине МПЛ по синусоидальному закону. Амплитуды тока I_0 и напряжения U_0 связаны с волновым сопротивлением Z микрополосковой линии следующим соотношением [2]:

$$U_0 = Z I_0. \quad (6)$$

Нижайшую частоту собственных колебаний в регулярном отрезке МПЛ имеет первая продольная мода. В МПЛ с разомкнутыми концами (рисунок 4) на любой моде его концах устанавливаются пучности электрического поля, а пучности магнитного поля устанавливаются внутри резонатора. В микрополосковом резонаторе с замкнутыми на экран концами наоборот – пучности электрического поля устанавливаются внутри резонатора, а магнитного – на его концах.

Анализируя рисунок 3, можно сказать, что на резонансных частотах по длине резонатора укладывается целое число полуволн, т. е.:

$$l = \frac{mu}{2}, \quad (7)$$

где m – номер продольной моды; $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega\sqrt{\epsilon_{эф}}}$ – длина волны в МПЛ.

Отсюда резонансная частота m -ой продольной моды резонатора

$$f_m = \frac{mc}{2l\sqrt{\epsilon_{эф}}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что резонансные частоты высших продольных мод МПР с разомкнутыми концами кратны нижней резонансной частоте, т.е. спектр резонансных частот регулярных МПР почти эквидистантный. Отметим, что в реальных микрополосковых резонаторах с увеличением частоты возрастает дисперсия волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости. Это выражается в постепенном уменьшении частот высших продольных мод колебаний с увеличением номера моды m . На этих частотах приходится учитывать волны высших типов в расчете и, следовательно, дисперсию [2].

Кривые распределения высокочастотного напряжения (рисунок 4) (1, 2) и кривые распределения высокочастотного тока (3, 4) по длине резонатора с разомкнутыми концами для кривых первой (1, 3) и кривых второй (2, 4) моды колебаний.

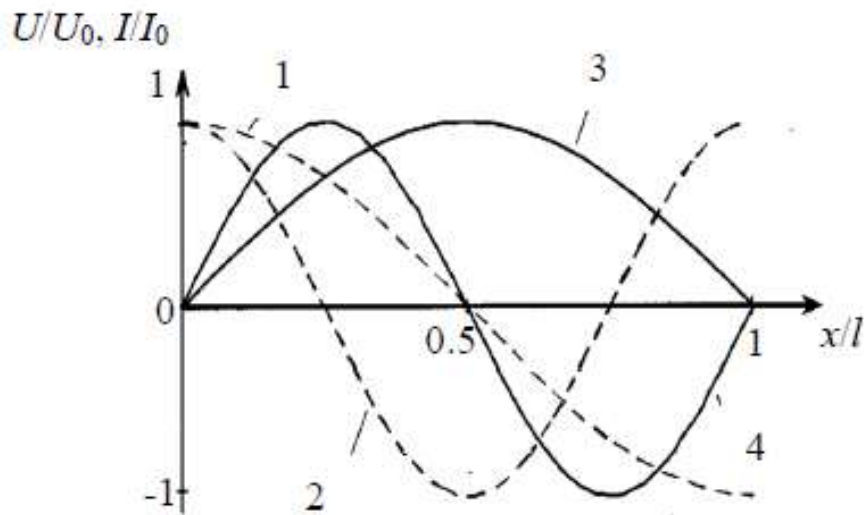


Рисунок 4 – Распределение напряжений и токов по длине резонатора [2]

На практике для улучшения селективных характеристик микрополосковых фильтров используют не один, а несколько электромагнитно связанных (полностью или частично) микрополосковых резонаторов. Наиболее распространенные конструкции

фильтров представляют собой четырехполюсники, отражающие СВЧ мощность электромагнитных волн в полосах заграждения. Селективные свойства таких фильтров, характеризуют функции частотных зависимостей прямых и обратных потерь:

$$L(f) = -10\lg|S_{21}(f)|^2 R(f) = -10\lg|S_{11}(f)|^2, \quad (9)$$

где S_{ij} – элементы матрицы рассеяния четырехполюсника, f – частота. Зависимость $L(f)$ называют амплитудно - частотной характеристикой (АЧХ) фильтра.

2.2 Добротность микрополоскового резонатора

Добротность произвольной колебательной системы есть безразмерная величина Q , определяемая по формуле:

$$Q = \frac{\omega w}{P}, \quad (10)$$

где ω – частота колебаний; w – запасенная системой энергия; P – усредненная по времени мощность потерь. Собственная добротность Q_0 характеризует свойства уединенной колебательной системы, а внешняя добротность Q_e характеризует величину связи колебательной системы с внешним окружением. Собственная добротность микрополоскового резонатора определяется добротностью диэлектрической подложки и добротностью металлических проводников:

$$Q_0 = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta + \frac{\Delta}{H}}, \quad (11)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала подложки; Δ – глубина скин - слоя в металлической полоске.

2.3 Микрополосковый резонатор с СВС

Микрополосковый резонатор с СВС обладает существенными достоинствами по сравнению с регулярными МПР. Одно из основных достоинств, первым отмеченным в литературе, является некратность резонансных частот. Скачки волнового сопротивления позволяют существенно уменьшить размеры МПР или понизить частоту основного резонанса при тех же габаритах резонатора. Так же СВС позволяет отодвинуть частоты

высших резонаторов далеко от частоты основного резонанса. В микрополосковом резонаторе, как показывает практика, СВС может повысить собственную добротность резонатора [4].

Одним из случаев нерегулярных резонаторов является микрополосковый резонатор со ступенчатым изменением волнового сопротивления, образующей его линии, то есть содержащий скачки волнового сопротивления (СВС). Такой резонатор можно рассматривать как конструкцию, состоящую из нескольких отрезков регулярных микрополосковых линий с разными волновыми сопротивлениями. Различие волновых сопротивления отрезков можно обеспечить известными методами: конфигурацией проводников на однородной подложке, использованием подложек с разными диэлектрическими проницаемостями (рисунок 5) и использованием резонатора, состоящий из резонаторов различной ширины (рисунок 6).

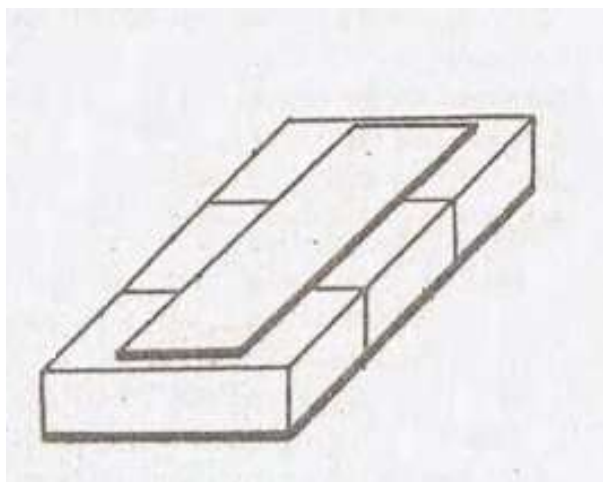


Рисунок 5 – Резонатор на подложке с разными диэлектрическими проницаемостями [4]

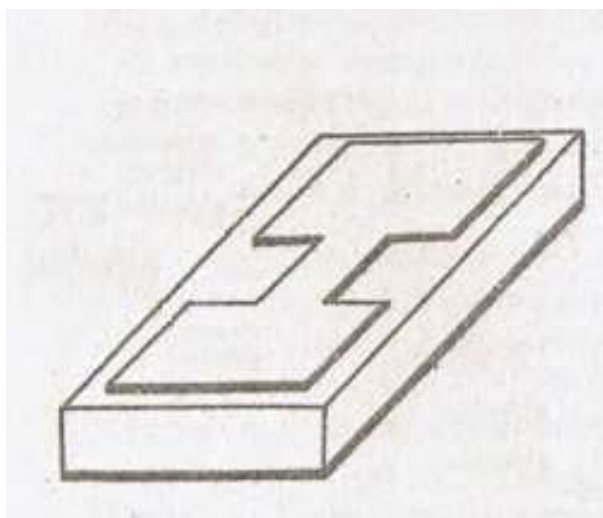


Рисунок 6 – Резонатор, состоящий из нескольких резонаторов с разной шириной [4]

Наибольший интерес для исследования представляют полуволновой резонатор с разомкнутыми концами и четвертьволновой, у которого один конец полоски замкнут на экран, а другой разомкнут. Полуволновой содержит два идентичных отрезка МПЛ, соединенных между собой третьим отрезком МПЛ, как правило, имеющим большее волновое сопротивление (рисунок 7).

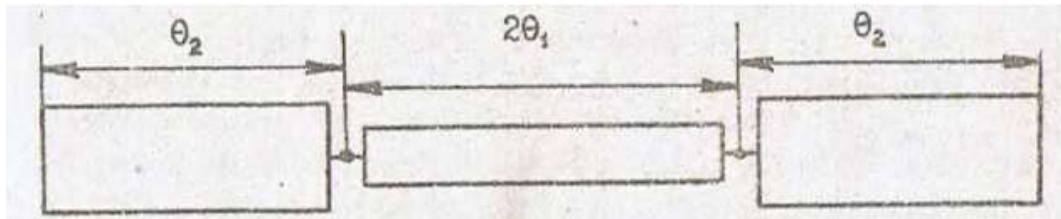


Рисунок 7 – Принципиальная схема полуволнового микрополоскового резонатора с СВС [4]

2.4 Влияние СВС на спектр частот и размеры МПР

Получим уравнение для нахождения спектра частот полуволнового МПР со скачком волнового сопротивления. Расчет будем производить в квазистатическом приближении, предполагая, что ширина полоски и толщина d подложки много меньше длины поперечной волны в диэлектрике. Кроме того будем считать, что ширина полоски любого регулярного участка нерегулярного МПЛ меньше длины этого регулярного участка. В этом случае распределение напряжения и тока по полоске МПР можно описать в одномерном приближении. Пусть средний участок нерегулярного МПР имеет длину $2L_1$, волновое сопротивление Z_1 , и относительную эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{1\text{эф}}$, а два крайних участка имеет длину L_2 , волновое сопротивление Z_2 и относительную эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{2\text{эф}}$. Таким образом, полная длина резонатора $L = 2L_1 + 2L_2$, так как полуволновой резонатор симметричен относительно точки $X = 0$, то все собственные колебания резонатора будут подразделяться на симметричные и антисимметричные. В общем случае распределение напряжения $U(x)$ и интегрального тока $I(x)$ по среднему участку резонатора для антисимметричных колебаний имеет вид [4]:

$$I(x) = l_1 \cos\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{1\text{эф}}} x\right) \cos \omega t \quad (12)$$

$$U(x) = z_1 l_1 \cos\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{1\text{эф}}} x\right) \sin \omega t \quad (13)$$

а для симметричных колебаний имеет:

$$I(x) = l_1 \sin\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{13\phi}} x\right) \cos \omega t \quad (14)$$

$$U(x) = -z_1 l_1 \cos\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{13\phi}} x\right) \sin \omega t \quad (15)$$

Распределение тока и напряжения по правому участку резонатора для симметричных и несимметричных колебаний имеет одинаковый вид:

$$I(x) = l_2 \sin\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{13\phi}} x (L_1 + L_2 - x)\right) \cos \omega t \quad (16)$$

$$U(x) = z_2 l_2 \cos\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{23\phi}} x (L_1 + L_2 - x)\right) \sin \omega t \quad (17)$$

Распределение тока и напряжения по левому участку резонатора легко получить, отображает симметрично или антисимметрично распределение. При записи распределения (16) и (17) пренебрегалось концевой емкостью резонатора. Предполагалось также отсутствие в резонаторе всяких потерь СВЧ мощности. Используя выражения и условия непрерывности тока и напряжения в точках, получаем уравнение для нахождения частоты симметричных колебаний:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c} L_2 \sqrt{\epsilon_{23\phi}}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c} L_1 \sqrt{\epsilon_{13\phi}}\right) - \frac{z_1}{z_2} = 0 \quad (18)$$

Аналогично получаем уравнение для нахождения частоты симметричных колебаний:

$$\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c} L_2 \sqrt{\epsilon_{23\phi}}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c} L_2 \sqrt{\epsilon_{13\phi}}\right)} + \frac{z_1}{z_2} = 0 \quad (19)$$

Введем обозначения для электрической длины регулярных участков резонаторов $\theta = \frac{\omega}{c} L_1 \sqrt{\epsilon_{13\phi}}$, $\theta = \frac{\omega}{c} L_1 \sqrt{\epsilon_{13\phi}}$ электрической длины всего резонатора $\theta_T = 2(\theta_1 + \theta_2)$ и относительной электрической длины среднего участка $\theta_T = 2\left(\frac{\theta_1}{\theta_T}\right)$. Тогда уравнения (15) и (16) можно переписать соответственно в виде:

$$tg\theta_2 tg\theta_1 - \frac{z_1}{z_2} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{tg\theta_2}{tg\theta_1} + \frac{z_1}{z_2} = 0 \quad (21)$$

На рисунке 8 по формулам (20) и (21) построена зависимость колебаний МПР от величины скачка волнового сопротивления для четырех значений относительно диэлектрической длины среднего участка резонатора.

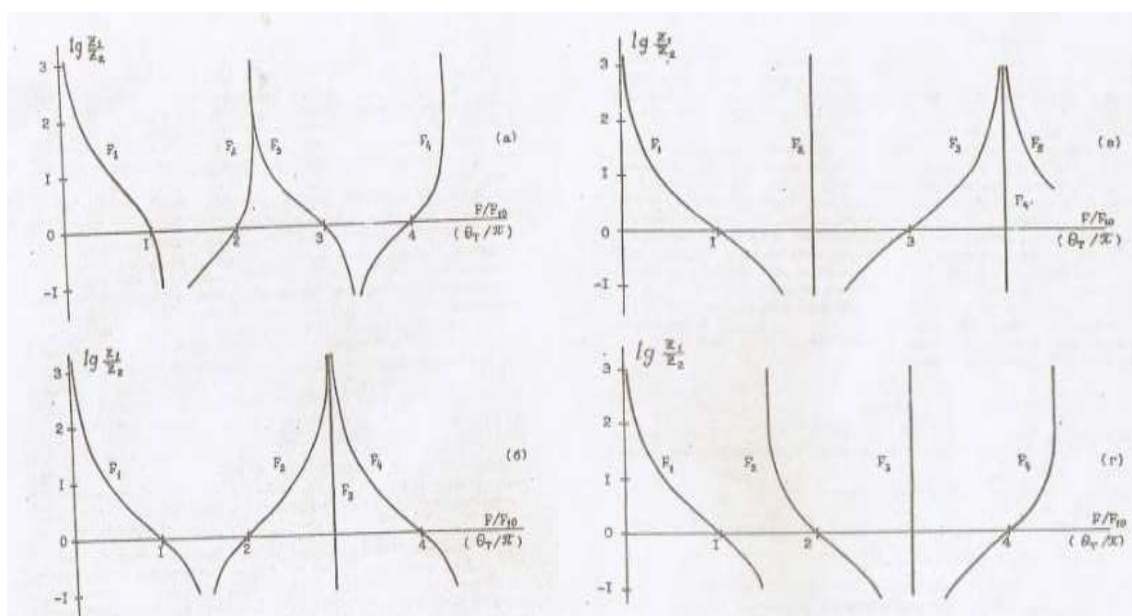


Рисунок 8 – Зависимость частот МПР от величин СВС при различных окончаниях относительной электрической длины среднего участка резонатора [5]

Все приведенные моды колебаний пронумерованы в порядке возрастания их частоты. При этом, как и в регулярном в резонаторе, происходит чередование ветвей симметричных и несимметричных колебаний, причем четные номера отвечают симметричным колебаниям, а нечетные номера отвечают антисимметричным колебаниям. Частоты всех колебаний нормированы на частоту первой моды регулярного резонатора. Заметим, что нормированная частота совпадает с нормированной электрической длиной резонатора. Из рисунка 8 видно, что уменьшение волнового сопротивления Z_1 внутреннего участка резонатора всегда приводит к ограниченному повышению частоты F_1 первой моды, а увеличение Z_1 – к ограниченному понижению F_1 . Последнее обстоятельство можно использовать для уменьшения длины МПР. Влияние же СВС на частоты высших мод различно и зависит от относительной электрической длины среднего

участка резонатора. Зависимость двух низших мод от относительной диэлектрической длины среднего участка МПР для трех значений приведена на рисунке 9.

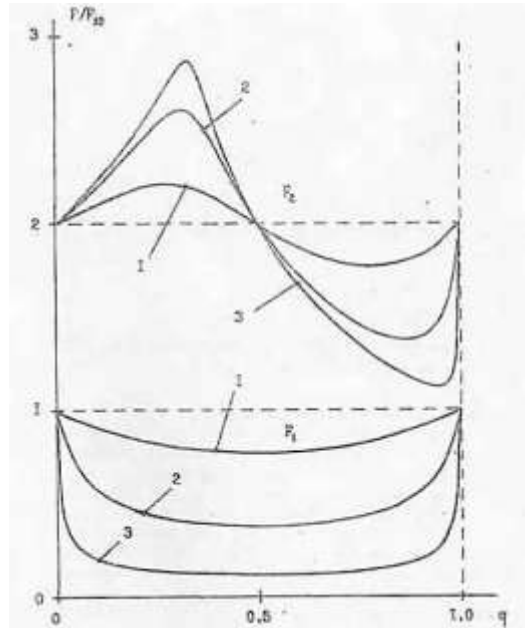


Рисунок 9 – Зависимость частот первой и второй моды МПР с СВС от относительной электрической длины среднего участка резонатора при различных значениях СВС

Видно, что частота первой моды имеет два одинаковых максимума и один минимум. При этом величина максимума не зависит от СВС и совпадает с частотой регулярного МПР. Минимум же частоты первой моды тем глубже, чем больше отношения волновых сопротивлений. Частота второй моды имеет один минимум и один максимум. С увеличением скачка максимум частоты второй моды F_2 приближается к частоте третьей моды регулярного МПР, а минимум F_2 приближается к частоте первой моды регулярного МПР F_1 . Найдем положение минимума частоты F_1 , а значит и минимума электрической длины резонатора для первой моды. Для этого уравнение (17) перепишем в виде:

$$\operatorname{tg} \frac{\theta_T}{2} = \frac{\operatorname{tg}^2 \theta_1 + \frac{z_2}{z_1}}{(1 - \frac{z_2}{z_1}) \operatorname{tg} \theta_1} \quad (22)$$

Дифференцируя правую часть уравнения (19) по q , а затем, приравнявая ее нулю, находим электрическую длину среднего участка резонатора

$$\Theta_T = \arctg \sqrt{\frac{z_2}{z_1}} \quad (23)$$

Подставляя (23) в уравнения (22), находим электрическую длину МПР

$$\Theta_T = \arctg \sqrt{\frac{z_2}{z_1}} \quad (24)$$

и относительно электрическую длину его среднего участка.

Таким образом, МПР с СВС имеет минимальную электрическую длину и частоту первой моды колебаний. Скачок волнового сопротивления позволяет не только уменьшать длину МПР, но и прореживать спектр его частот вблизи частоты первой моды. На рисунке 10 по формулам (20) (21) построена зависимость отношения частоты первой моды к частоте второй относительной электрической длины среднего участка МПР различных величинах СВС.

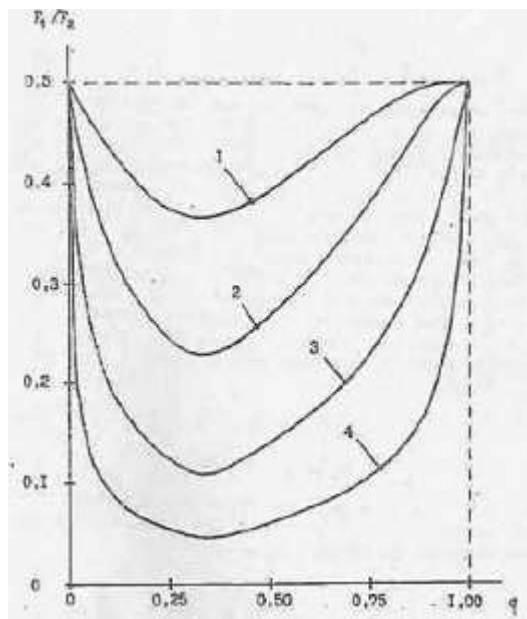


Рисунок 10 – Зависимость отношения частот первой и второй моды от относительной электрической длины среднего участка МПР для четырех значений величины СВС

Видно, что отношение F_1 / F_2 имеет один минимум, который при любом СВС расположен в точке . Глубина минимума возрастает с увеличением скачка. Подставляя в уравнение (20) и (21), находим частоты первой и второй моды

$$\left(\frac{F_1}{F_2}\right)_{min} = \frac{\arctg\left(\frac{2z_1}{z_2}+1\right)^{-1/2}}{\frac{\pi}{2}-\arctg\left(\frac{2z_1}{z_2}+1\right)^{-1/2}} \quad (25)$$

Уравнение для нахождения спектра частот четвертьволнового МПР со скачком волнового сопротивления можно получить аналогичным способом. Особенностью четвертьволнового резонатора является то, что напряжение в точке $X = 0$ для любой моды колебаний равно нулю. Так как этому условию удовлетворяют все антисимметричные колебания полуволнового резонатора, то уравнение задает спектр частот всех колебаний четвертьволнового МПР с СВС. Анализ показывает, что минимум функции $F_1(q)$ и минимум отношения $(q)/F_2(q)$ имеет место в одной и той же точке. Частоты первой и второй моды колебаний четвертьволнового МПР с СВС находится по формулам:

$$F_{1q} = F_{10} \frac{4}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{z_2}{z_1}} \quad (26)$$

$$F_{2q} = F_{10} \frac{4}{\pi} (\pi - \arctg \sqrt{\frac{z_2}{z_1}}) \quad (27)$$

Таким образом МПР с большим СВС представляет собой промежуточное звено между электродинамическим резонатором и радиотехническим контуром.

2.5 Настройка трехзвенного микрополоскового фильтра

Чтобы оптимально настроить АЧХ трехзвенного фильтра, фильтр должен удовлетворять четырем условиям [4].

Первым условием является совпадение центральной частоты полосы пропускания с заданной величиной по ТЗ. Известно, что резонансные частоты МПР обратно пропорциональны их длине l_r . Поэтому настройка центральной частоты на заданную производится пропорциональным изменением длин l_r всех полосковых проводников. Причем для понижения центральной частоты следует увеличить длину резонаторов, а для её повышения необходимо укоротить длину резонаторов [4].

Вторым условием является совпадение ширины полосы пропускания с заданной $(F_{hpass}-F_{lpass})$. Величина расщепления резонансных частот, взаимодействующих МПР и ширина полосы пропускания фильтра пропорциональны коэффициенту связи резонаторов. Поэтому для настройки ширины полосы пропускания следует производить

те операции, которые влияют на коэффициент $k_{св}$. К числу этих операций прежде всего относится вариация зазора S между полосковыми проводниками. При этом увеличение S приводит к уменьшению ширины полосы пропускания и наоборот. В меньшей степени шириной полосы пропускания можно управлять изменением ширины полосковых проводников. Увеличение W также приводит к уменьшению ширины полосы пропускания и наоборот.

Необходимо отметить, что при заданном значении коэффициентов $k_{св}$ некоторое влияние на ширину полосы пропускания оказывает и величина связи крайних резонаторов с линиями передачи. При малой средней величине этой связи, когда разрешаются все пики обратных потерь, увеличение ее приводит к сужению полосы пропускания и наоборот. Однако, как будет видно ниже, настраивать ширину полосы пропускания варьированием величины связи МПР с линиями передачи не следует.

Третье условие удобнее сформулировать как равенство среднего значения минимумов обратных потерь $(R_1 + R_2)/2$ данной величине R_{min} . Для управления средним значением минимумов следует использовать величину связи МПР с линиями передачи. Ослабление этой связи приводит к понижению среднего значения минимумов вплоть до нуля. Усиление же приводит сначала к повышению $(R_1 + R_2)/2$, а затем к уменьшению числа разрешенных пиков обратных потерь [4]. Понижение среднего значения минимумов до нуля физически понятно: нет связи с линиями передачи, нет и потерь в отражённой волне, так как вся энергия отражается от фильтра. Таким образом, для повышения среднего значения минимумов обратных потерь точку подключения МПР к линии передачи следует переместить дальше от середины резонатора (узла напряжения), а для понижения – ближе.

Четвёртое условие формулируется как равенство минимумов обратных потерь R_1 и R_2 . Нарушение этого равенства устраняется подстройкой резонансной частоты МПР. При $R_1 < R_2$ следует повысить резонансную частоту внутреннего МПР, а при $R_1 > R_2$ - понизить. Повышение резонансной частоты осуществляется противоположенными операциями.

Дадим физическое обоснование рекомендуемым операциям. На любой резонансной частоте связанных колебаний, когда резонансные частоты всех МПР совпадают, все резонаторы запасают одинаковую энергию. Поэтому ни один из пиков обратных потерь, отвечающих резонансным частотам связанных колебаний, нельзя отнести к какому-либо одному из резонаторов. Если же резонансная частота какого-либо из МПР будет отличаться от резонансной частоты остальных МПР, то на одной из резонансных частот связанных колебаний выпадающий по частоте МПР будет запасать больше энергии, чем остальные МПР. Поэтому пик обратных потерь, отвечающий этой резонансной частоте

связанных колебаний, относится именно к тому МПР, резонансная частота которого выпадает. Каждый же из остальных пиков по-прежнему нельзя будет отнести к какому-либо одному из оставшихся МПР. Таким образом, пик обратных потерь, отделенный от остальных пиков глубоким минимумом R_i можно связать с тем МПР, резонансная частота которого отличается от резонансной частоты других МПР. Если отделившийся пик расположен по частоте ниже остальных пиков, то резонансную частоту выпавшего резонатора следует повысить. При этом, очевидно, глубоким разделяющим минимумом будет R_1 , в противоположном случае разделяющим минимумом будет R_2 , а частоту выпавшего резонатора следует понизить.

3 Работа в программе «Скальпель 96»

После включения установки, запускаем «Скальпель 96», используя файл Rez.exe. Программа выводит на рабочем окне сообщение о связи программы с установкой. Для дальнейшей работы необходимо произвести калибровку (клавиши alt+F7) Прибор устанавливает столик в нулевые координаты. Работа с прибором осуществляется через меню, либо через горячие клавиши, которые так же приведены в разделе помощи (клавиша F1).

Горячие клавиши:

- 1) (Alt+X) выход из программы;
- 2) Открыть файл (F2) используется для выбора файла с топологией. Расширение файла .top. Место нахождения файла в папке, в которой находится управляющая программа Rez.exe, чтобы выбрать файл используем клавишу Tab или курсор;
- 3) (F3) запускается процесс вырезания топологии;
- 4) Дополнительные функции (F4) установление столика нужной высоты, поворот резачка, сдвиг резачка по X и Y;
- 5) Параметры (F6) используется для ввода дополнительных параметров, такие как количество шагов двигателей на 1 мм хода, на градус поворота. Для изменения таких параметров необходимо приобрести опыт в вырезании;
- 6) Связь программы с устройством (alt+F6) установить связь программы с установкой «вручную», если по какой-то причине этого не произошло автоматически;
- 7) Калибровка (alt+F7) Рекалибровка установки в нулевые координаты. Следует всегда делать после включения или перед вырезанием топологии.
- 8) Калькулятор (F7);
- 9) Редактор (F8) Вызов окна программы для ввода координат (редактирование) вырезаемой топологии, которая сохраняется в корень управляющей программы;
- 10) Просмотр топологии(F9) позволяет посмотреть в графическом режиме топологию, которая загружена в память программы.

3.1 Настройка резачка

Для проверки правильности настройки резачка предлагается файл test.top, который загружаем как обычный файл топологии. Он содержит топологию двух квадратов размерам 1 на 1 мм. При правильной настройке смежные стороны квадратов образуют крест, и резы, образующие стороны квадратов пересекаются.

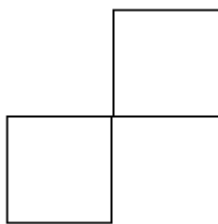


Рисунок 11 –Элемент для составления схемы

Если же резак не настроен, то картинка выреза будет подобная на рисунке 12

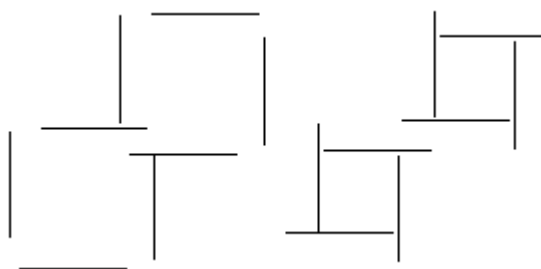


Рисунок 12 –Элемент для составления схемы

3.2 Изготовление резачка

Резачок изготавливаются из бритвенных лезвий. Примерные размеры резачка приведены на рисунке

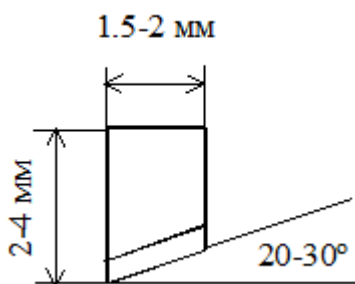


Рисунок 13 –Элемент для составления схемы

Ослабив стопорящий винт, подвижную часть резака поднять вверх, снять резачок, поставить новый и закрутить винт обратно. Резачок следует крепить так, чтобы его лезвие смотрело в сторону, противоположную плоской пружине на которой он подвешен. Если закрепить наоборот, то он не будет резать, а задирает лак.

4 Microwave office (Микроволновый офис)

Microwave office (Микроволновый офис) предназначен для разработки схем и радиоэлектронных систем СВЧ диапазона.

В его состав входят программы моделирования схем электронных цепей, разработки конструкций для реализации схем и проверки их функционирования на системном уровне.

Работа в программе:

В окне просмотра проекта на вкладке «Elements» (элементы) находится иерархическое дерево доступных библиотек. Среди них имеется библиотека «Substrates» (подложки) с элементом MSUB (микро-полосковая подложка) и библиотека «Microstrip» (микрополосковые) с группами «Lines» (линии) и «Coupled Lines» (связанные линии) с соответствующими наборами элементов.

При расчетах микрополосковые резонаторы разбиваются с помощью элементов библиотеки «Microstrip» на отрезки одиночных и связанных регулярных микрополосковых линий, соединенных между собой. Конструкция обязательно должна быть подключена к входному порту 1 ($Z_0 = 50 \text{ Ом}$) и выходному порту 2 ($Z_0 = 50 \text{ Ом}$).

Основные элементы для составления схемы:

а) Элемент служит для указания откуда начинается строиться резонатор и его начальная ширина. По техническому заданию ширина проводника 4мм.

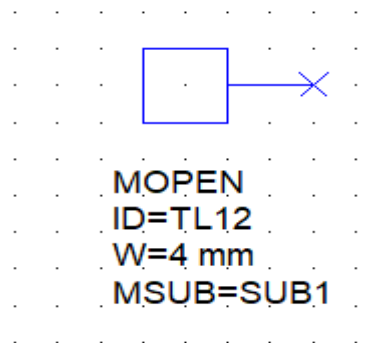


Рисунок 14 –Элемент для составления схемы

б) Элемент для связи двух резонаторов. $W1$ и $W2$ указывается ширина проводника, S какой зазор между резонаторами, L длина двух связных проводников.

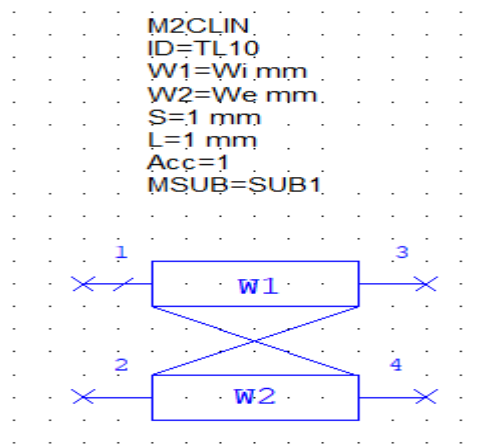


Рисунок 15 – Основной элемент для составления схемы

в) Элемент для связи трех резонаторов. $W1$, $W2$, $W3$ указывается ширина проводника, $S1$ и $S2$ какой зазор между резонаторами, L длина трех связанных проводников.

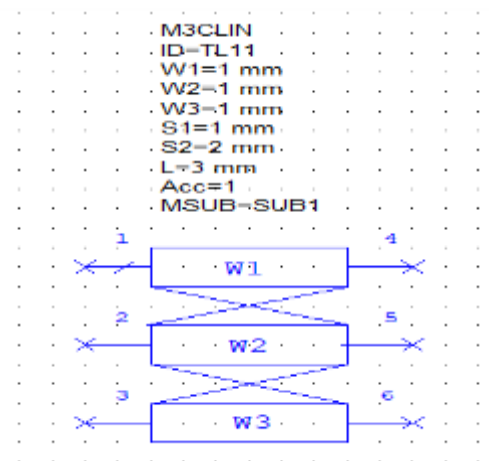


Рисунок 16 – Элемент для составления схемы

г) Этим элементом указывается дополнительная длина резонатора не связанного с другими резонаторами. L длина проводника.

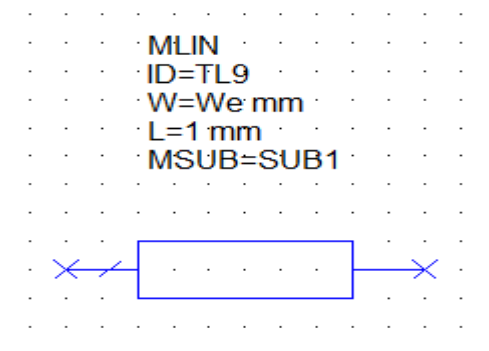


Рисунок 17 – Элемент для составления схемы

д) Задание параметров подложки: Er диэлектрическая проницаемость, H толщина подложки, $Tand$ – тангенс угла потерь диэлектрика, Rho – удельное сопротивление проводящего слоя относительно золота, $ErNom$ – номинальная диэлектрическая проницаемость, T – толщина проводящего слоя рассчитывается по формуле,

$$T = \frac{1}{Q},$$

где Q добротность.

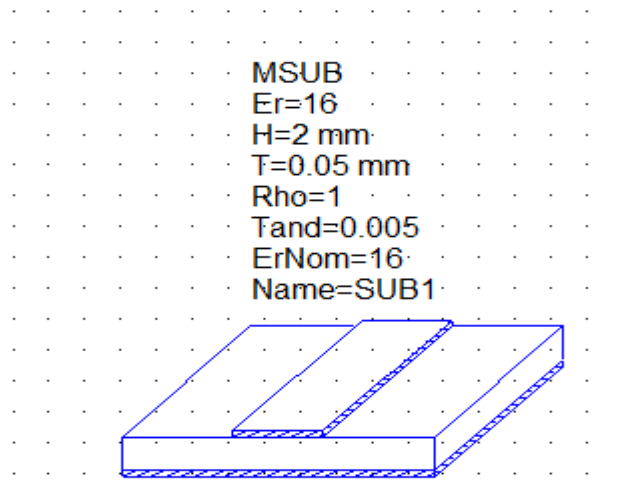


Рисунок 18 –Элемент для составления схемы

е) Элемент для назначения сопротивления подводящей линии.

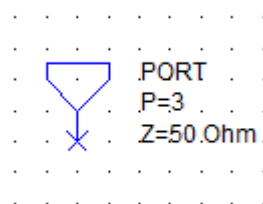


Рисунок 19 –Элемент для составления схемы

ж) Элемент для назначения магнитной индукции проводника, подключающего резонатор с поводящей линией.

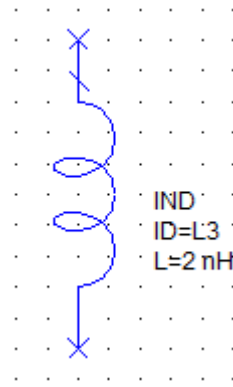


Рисунок 20 – Провод с индуктивностью

5 Практическая часть

5.1 Техническое задание

- а) центральная частота полосы пропускания $f_0 = 1,7 \pm 0,01$ ГГц;
- б) относительная ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ $f/f_0 = (12 \pm 0,1)$ %;
- в) уровень максимумов потерь на отражение в полосе пропускания -14 дБ;

Неизменяемые параметры:

- а) диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 16$.
- б) добротность $Q = 200$.
- в) толщина подложки $H = 2$ мм.
- г) ширина полосковых проводников $W = 4$ мм.
- д) длина «перемычки» от разъема до полоскового проводника $L_i = 2$ мм.
- е) волновое сопротивление «перемычки» $Z_i = 150$ Ом.

Моделирование АЧХ трехзвенного микрополоскового фильтра проводилось по программе Microwave Office. Используя данные из технического задания, и выполняя условия методики описанной в разделе 2.5, настраиваем фильтр для получения симметричной АЧХ с помощью изменения параметров:

- а) l_r (Для понижения центральной частоты следует увеличить длину резонаторов, а для повышения - укоротить).
- б) S (увеличение приводит к уменьшению ширины полосы пропускания и наоборот).
- в) W (увеличение приводит к уменьшению ширины полосы пропускания и наоборот).
- г) L_c (для повышения среднего значения минимумов обратных потерь точку подключения МПР к линии передачи следует переместить дальше от середины резонатора (узла напряжения), а для понижения - ближе).
- д) Равенство R_1 и R_2 (Нарушение этого равенства устраняется подстройкой резонансной частоты внутреннего МПР. При $R_1 > R_2$ следует повысить резонансную частоту внутреннего МПР, а при $R < R_2$ - понизить).

5.2 Моделирования АЧХ фильтра в AWR и его настройка

Принципиальная схема смоделированная в программе Microwave office:

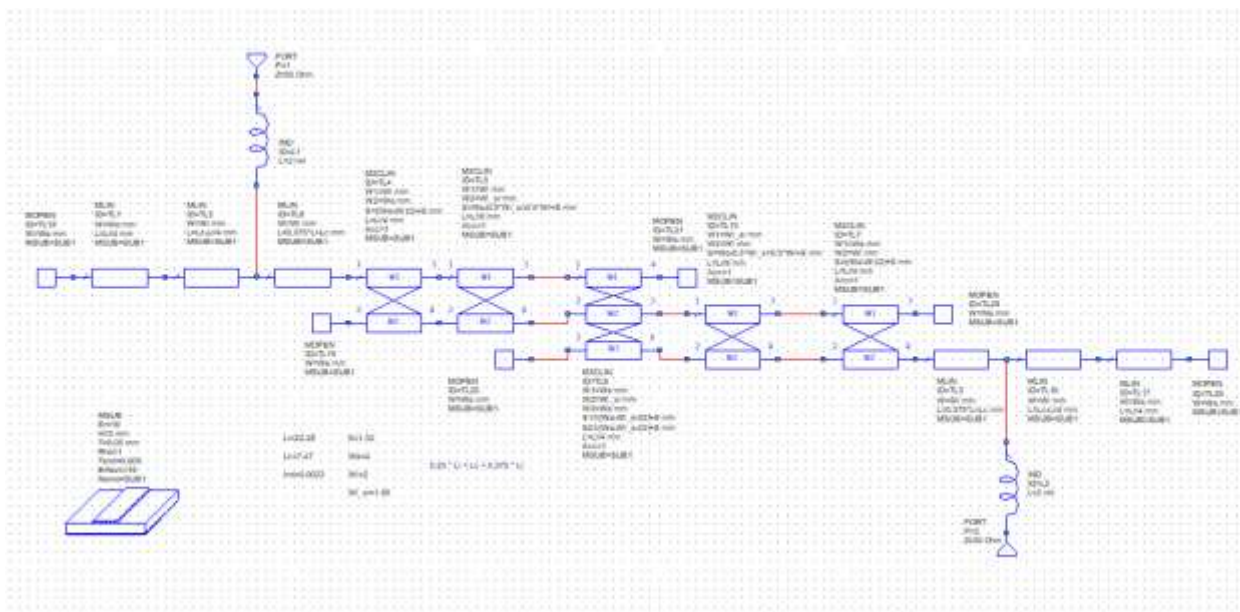


Рисунок 21 – Принципиальная схема трехзвенного фильтра с CBC

Топология смоделированного фильтра приведена на рисунке 22, а его АЧХ приведена на рисунке 23.

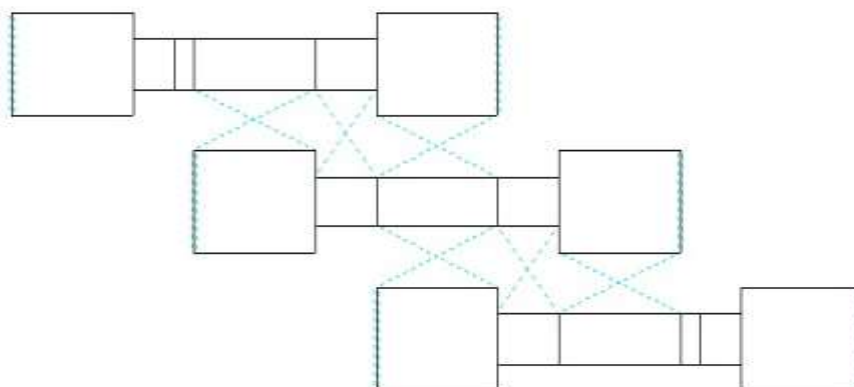


Рисунок 22 – Топология моделированного фильтра

Основные параметры фильтра этого АЧХ:

- 1) Зазор между резонаторами $S=1.32$ мм;
- 2) Расстояние подключения перемычки $L_c=7.47$ мм;
- 3) Длина резонатора $L_r=22.28$ мм;
- 4) Ширина средней части полосковых проводников крайних резонаторов $W_i=2$ мм;

- 5) Ширина средней части полоскового проводника центрального резонатора $W_{i\text{sr}}=1.88$ мм;
- 6) Ширина крайних полосковых проводников $W_e=4$ мм.

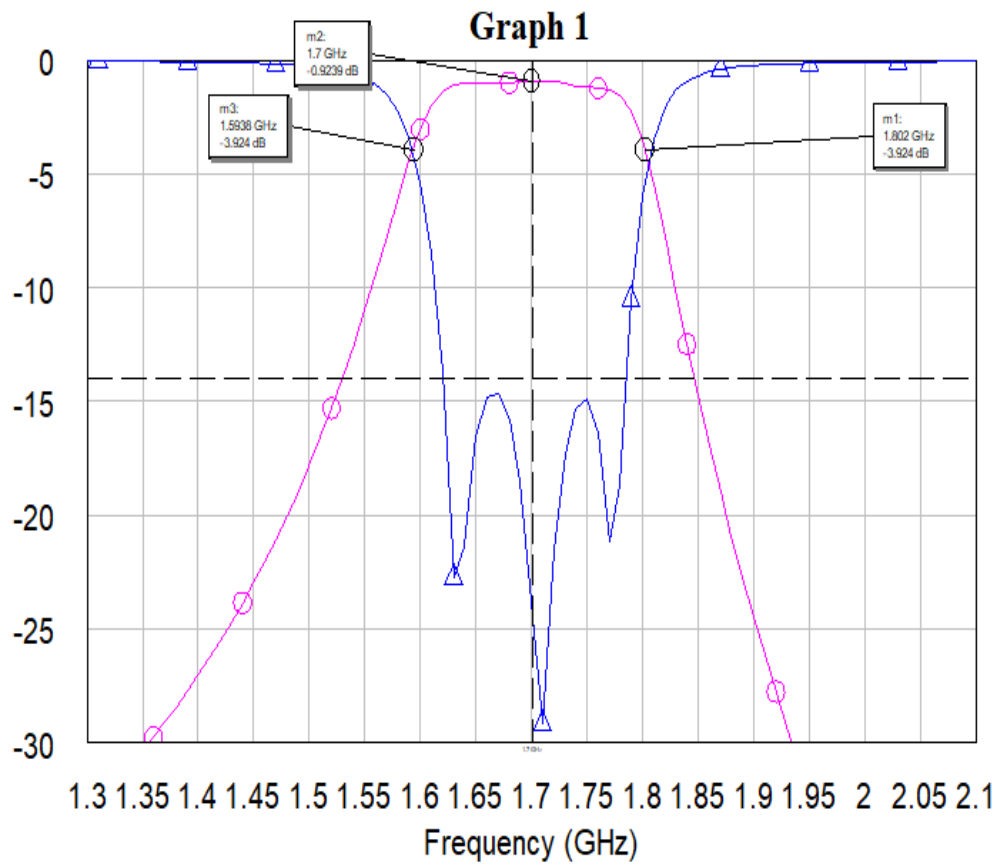


Рисунок 23 – Настроенная АЧХ фильтра в программе AWR

Параметры АЧХ:

- а) частота нижней границы на уровне 3дБ ($F_{1\text{pass}} = 1,5938$ ГГц);
- б) частота верхней границы на уровне 3дБ ($F_{h\text{pass}} = 1,802$ ГГц);
- в) Ширина полосы пропускания $\Delta F=204$ МГц;
- г) минимальные обратные потери (для левого минимума $R_{\text{min}} = -14,69$ дБ, для правого минимума $R_{\text{min}} = -14,93$ дБ);
- д) центральная частота полосы пропускания ($f_0=1,7$ ГГц).

5.3 Последовательность изготовления макета фильтра

В качестве изготовления фильтра взят материал фольгированный листовой арилокс наполненный (ФЛАН) - листовой сверхвысокочастотный материал, изготовленный из композиции на основе наполненного полифениленоксида, облицованный с двух сторон электролитической гальваностойкой медной фольгой толщиной. Отличается высокой стабильностью величины диэлектрической проницаемости, низкие диэлектрические потери в микроволновом диапазоне частот. Применяется для изготовления полосковых печатных плат микроволнового диапазона, элементов антенн и других изделий СВЧ-техники. Его диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ГГц составляет $16 \pm 0,8$; тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ГГц не более 0,005; толщина листов (включая медную фольгу) составляет $2,0 \pm 0,1$ мм; толщина медной фольги составляет 35 мкм (рисунок 13)[6].



Рисунок 24 – ФЛАН-16[6]

В качестве проводников использовали медную проволоку длиной 2 мм и диаметром 0.2 мм.

При изготовлении микрополосковых фильтров воспользовались методом гравировки по лаку.

Создание макета данным методом включает в себя:

- а) подготовку подложки (в данный этап входил расчет размеров фильтра и вырезание подложки);
- б) наметка будущих микрополосок (в данный этап вошло нанесение меток, где должны быть микрополоски и их размеры);
- в) вытравка микрополосок (в данном этапе мы наносили специальный лак на микрополоски, далее с помощью хлорида железа вытравливали металлизацию вокруг

микрополосок. К задней части текстолита с помощью воска приклеиваем стекло, для того чтобы нижнюю часть хлорид железа не вытравил металлизацию);

- г) спайка диэлектрической подложки с проводящей пластиной (экраном);
- д) подсоединение точек подключения;
- е) настройка характеристик и снятие АЧХ.

5.4 Координаты для вырезания на установке «Скальпель-96»

Таблица 1 – Координаты топологии трехзвенного фильтра

<i>N Res.</i>	<i>N Point</i>	X	Y
1	1	21.710	6.000
1	2	21.710	10.000
1	3	27.280	10.000
1	4	27.280	9.000
1	5	38.420	9.000
1	6	38.420	10.000
1	7	43.990	10.000
1	8	43.990	6.000
1	9	38.420	6.000
1	10	38.420	7.000
1	11	27.280	7.000
1	12	27.280	6.000
2	1	13.355	11.320
2	2	13.355	15.320
2	3	18.925	15.320
2	4	18.925	14.260
2	5	30.065	14.260
2	6	30.065	15.320
2	7	35.635	15.320
2	8	35.635	11.320
2	9	30.065	11.320
2	10	30.065	12.380
2	11	18.925	12.380
2	12	18.925	11.320
3	1	5.000	16.640
3	2	5.000	20.640
3	3	10.570	20.640
3	4	10.570	19.640
3	5	21.710	19.640
3	6	21.710	20.640
3	7	27.280	20.640

<i>N</i> <i>Res.</i>	<i>N</i> <i>Point</i>	X	Y
3	8	27.280	16.640
3	9	21.710	16.640
3	10	21.710	17.640
3	11	10.570	17.640
3	12	10.570	16.640
4	1	35.520	0.000
4	2	35.520	5.000
4	3	37.520	5.000
4	4	37.520	0.000
5	1	11.470	21.640
5	2	11.470	26.640
5	3	13.470	26.640
5	4	13.470	21.640

5.5 Этапы настройки фильтра

Первоначальные характеристики изготовленного фильтра, измеренные с помощью прибора Р2М-04 фирмы «Микран», данные приведены в таблице 1.

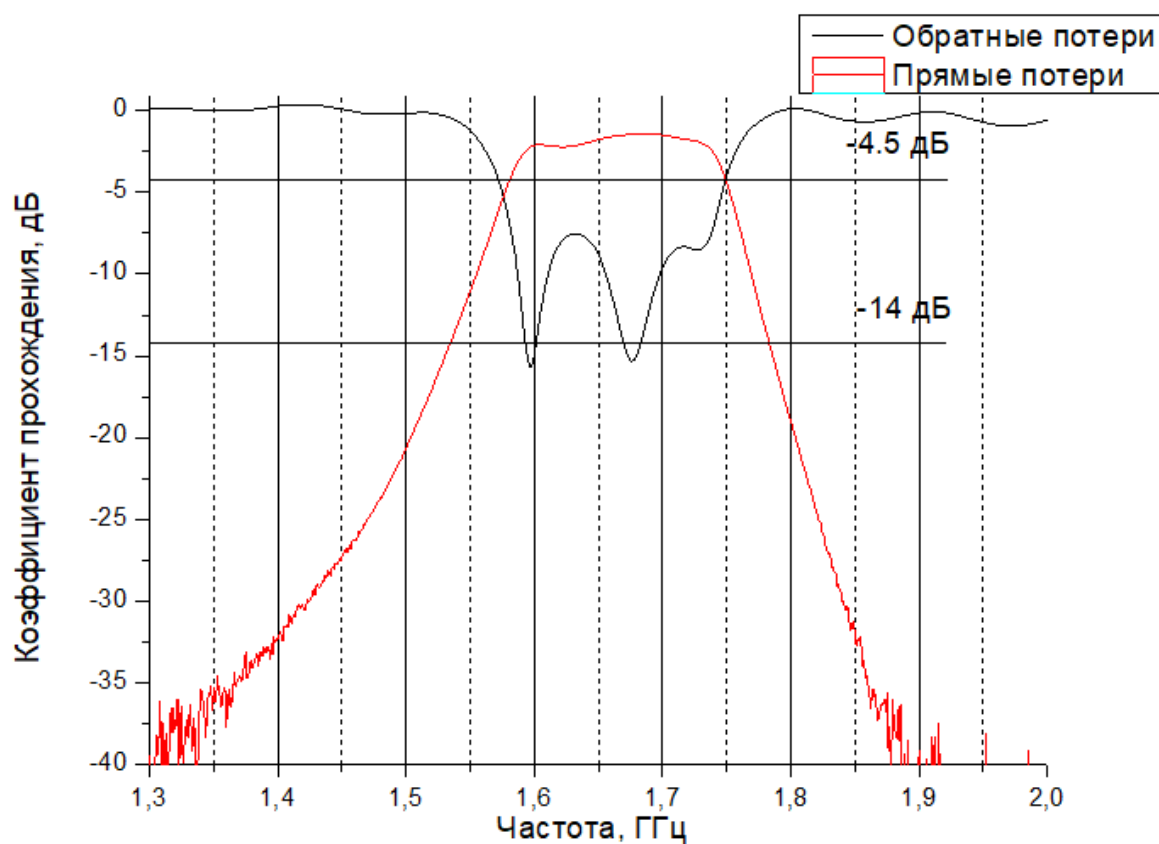


Рисунок 25 – Первоначальная АЧХ фильтра

Таблица 2 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Первый минимум обратных потерь, дБ	Второй минимум обратных потерь, дБ
1.67	1.575	1,765	-7.5	-8.5

Из рисунка 25 видно, что центральная частота не соответствует с ТЗ, малая величина обратных потерь, значит большой коэффициент отражения, необходимо получить чуть меньше -14дБ обратных потерь, так же минимумы обратных потерь не находятся на одном уровне. Ширина полосы пропускания так же не соответствует ТЗ. Для начала настраиваем центральную частоту.

Настройка будет происходить по методике настройки фильтра приведенного выше (3)

Делаем укорочение каждого резонатора L_c , чтобы центральная частота увеличилась.

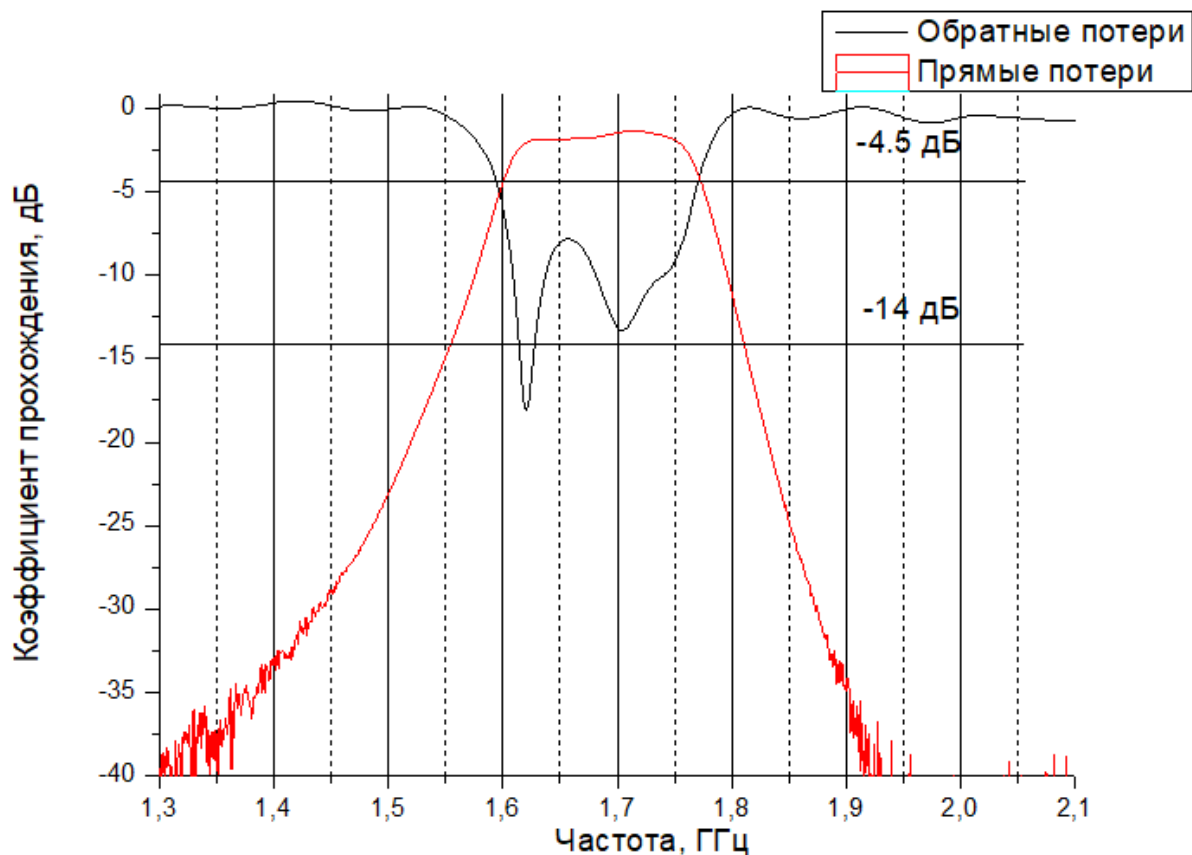


Рисунок 26 – АЧХ фильтра с измененными длинами резонаторов

Таблица 3 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Первый минимум обратных потерь, дБ	Второй минимум обратных потерь, дБ
1.69	1.615	1.785	-7.56	-11.17

Из рисунка 26 видно, что центральная частота приблизилась к ТЗ. Приступаем к настройке обратных потерь, чтобы минимумы были на одном уровне (стремимся к этому). Делаем укорочение средней микрополосковой линии L_e с каждой стороны.

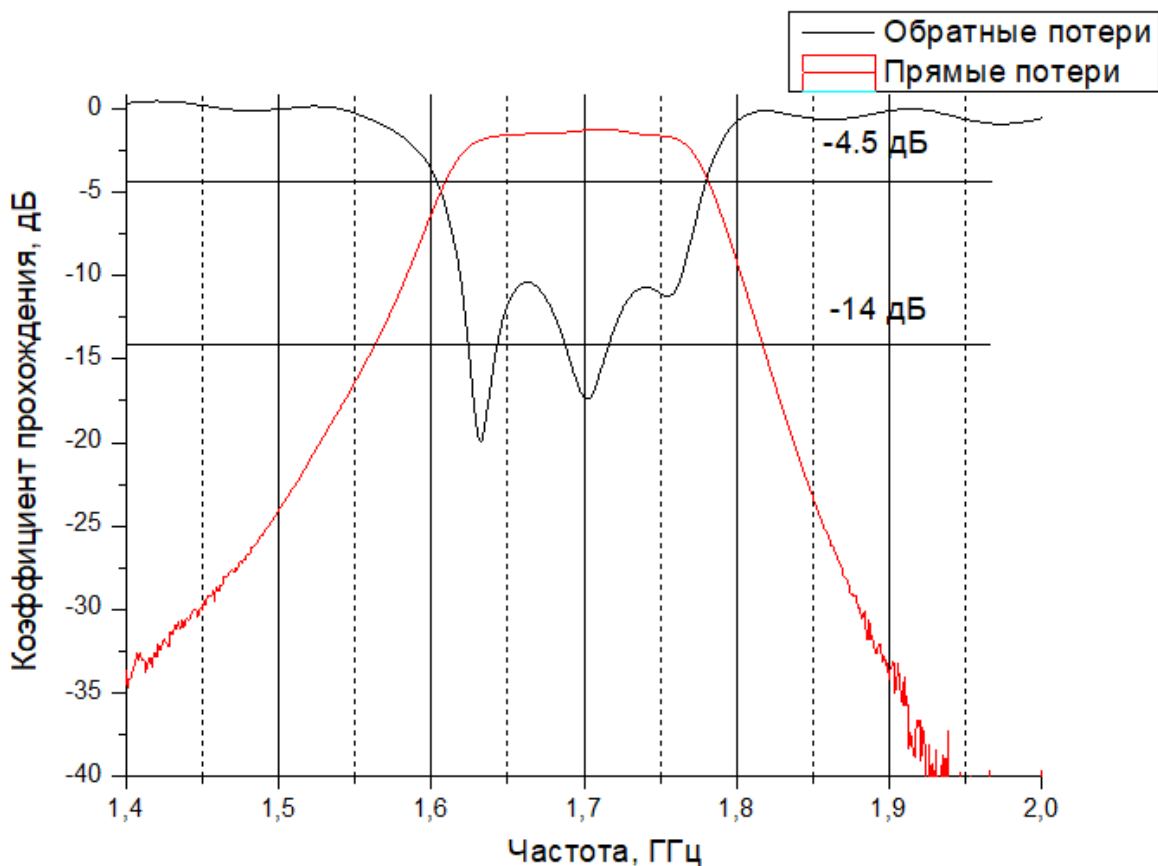


Рисунок 27 – АЧХ фильтра с измененной длиной среднего резонатора

Таблица 4 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная	Нижняя	Верхняя	Первый минимум	Второй минимум

частота, ГГц	граница, ГГц	Граница, ГГц	обратных потерь, дБ	обратных потерь, дБ
1.69	1.615	1.785	-10.56	-11.03

Из рисунка 27 видно, что минимумы обратных потерь выровнялись, но малая величина обратных потерь, необходимо уменьшить кондуктивное подключение резонаторов L_c для повышения среднего значения минимумов обратных потерь.

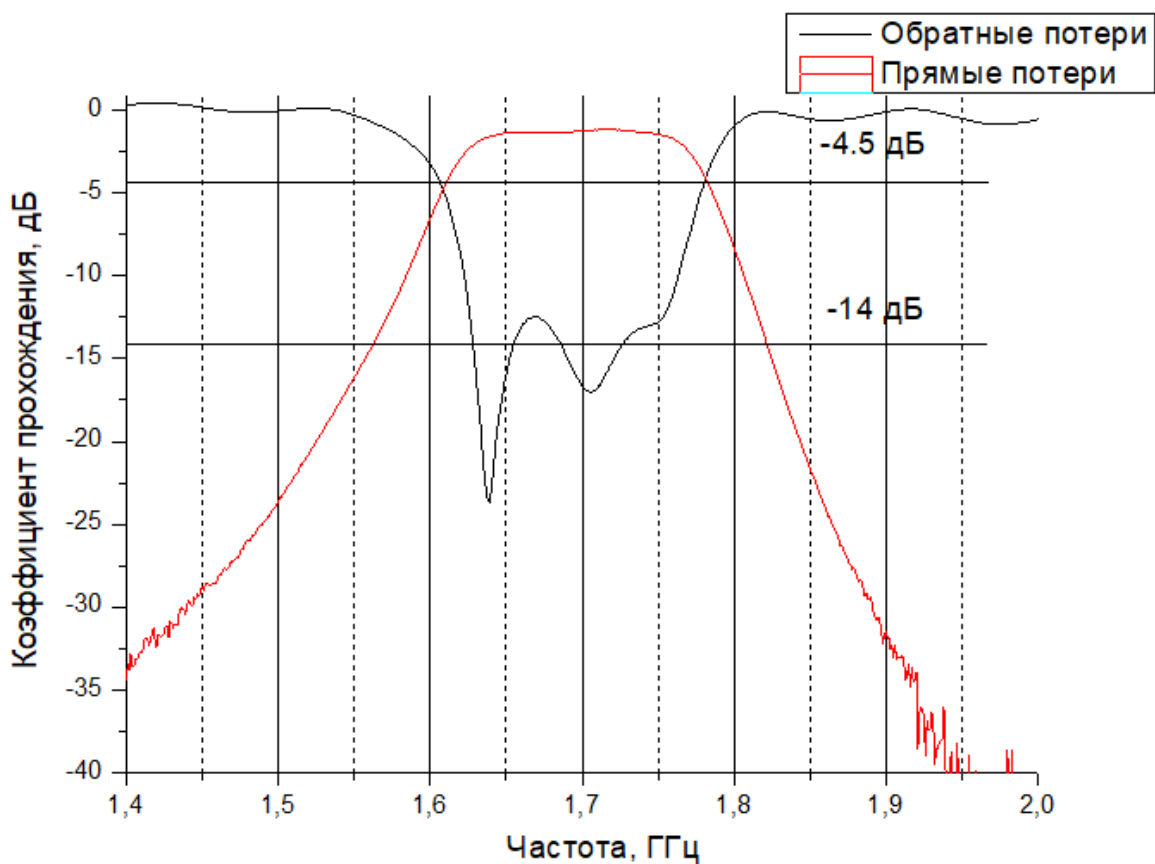


Рисунок 28 – АЧХ фильтра с измененным кондуктивным подключением

Таблица 5 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ
1.69	1.615	1.785	-10.56	-11.03

Из рисунка 28 видно, что обратные потери понизили, правый минимум пропадает. Используем влияние скачка волнового сопротивления на 3 резонаторе, для понижения частоты резонатора, таким образом СВС позволяет прореживать спектр частот.

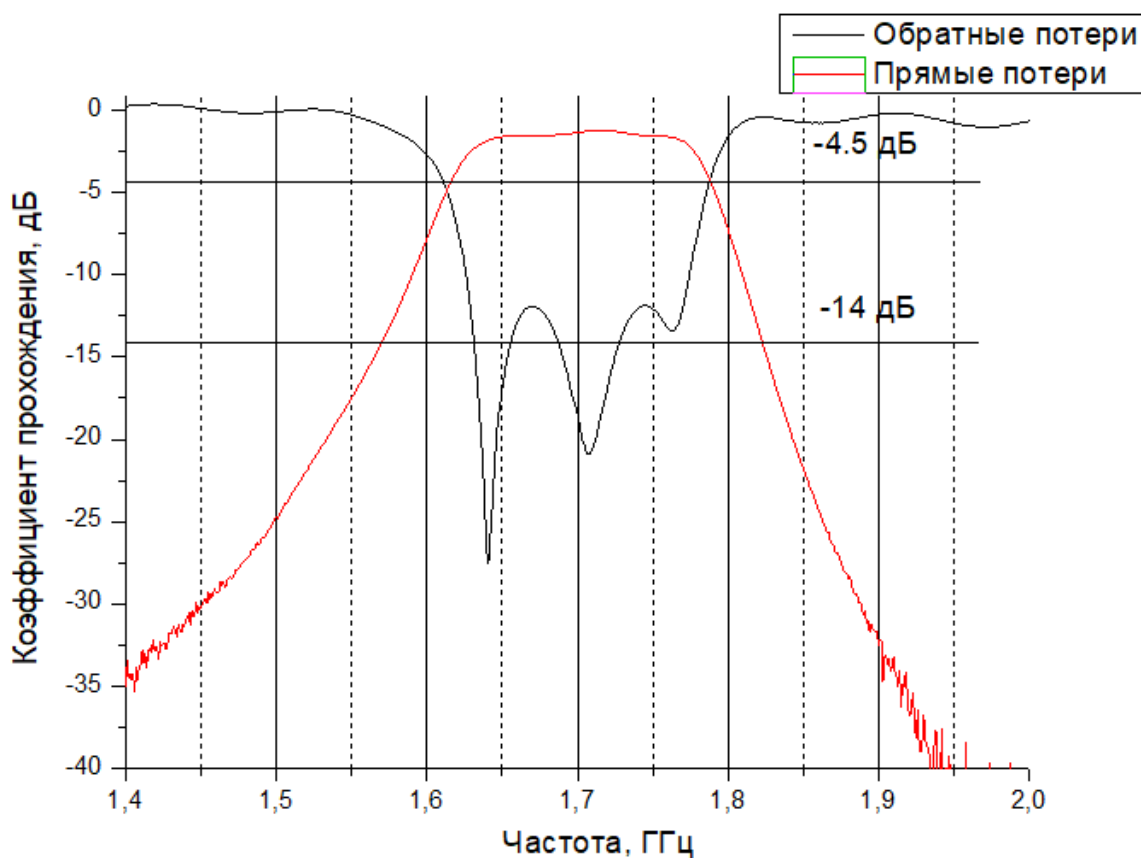


Рисунок 29 – АЧХ фильтра с СВС

Таблица 6 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ
1.69	1.615	1.785	-11.56	-11.35

Из рисунка 29 видно, что второй минимум стал более выражен. Продолжаем дальше повышать минимумы обратных потерь, путем уменьшения кондуктивного подключения резонаторов L_c

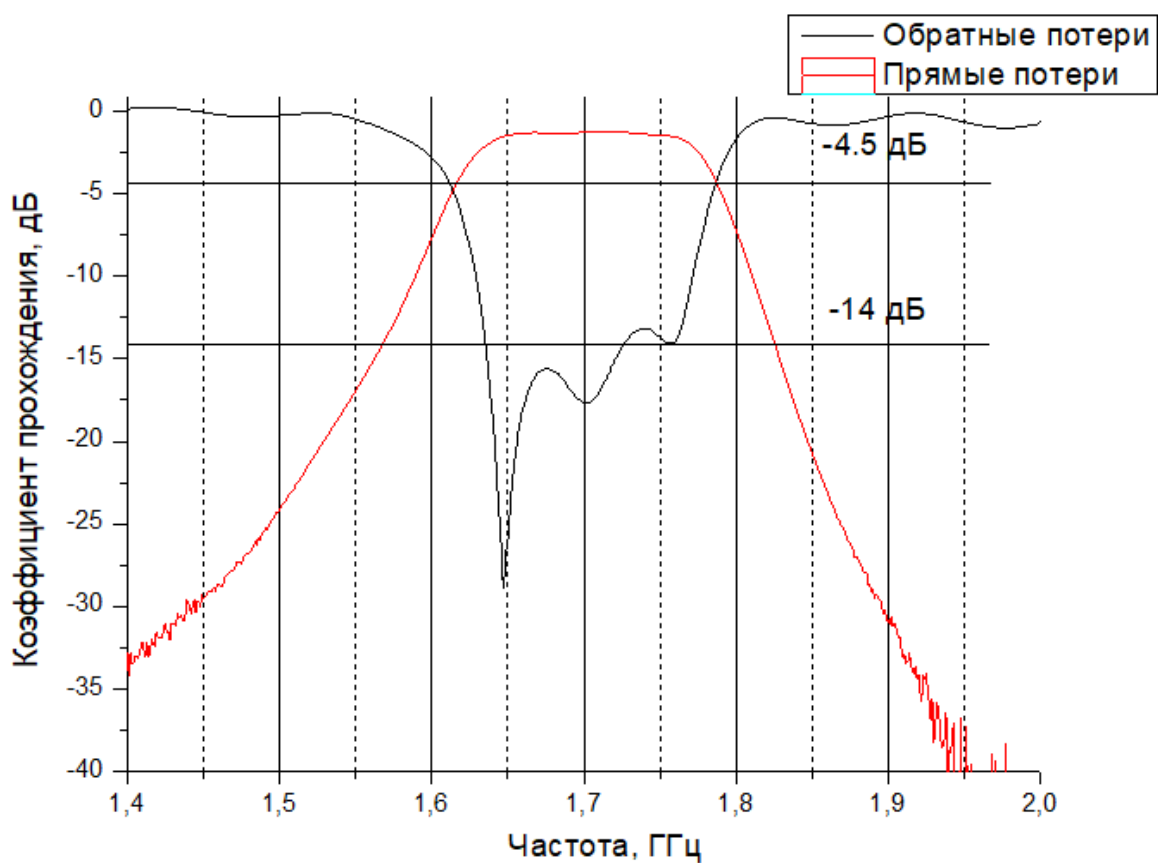


Рисунок 30 – АЧХ фильтра с измененным кондуктивным подключением

Таблица 7 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ
1.69	1.615	1.785	-16.53	-14.46

Из рисунка 30 видно, что левый минимум находится выше правого. Делаем укорочение средней микрополосковой линии L_e с каждой стороны, чтобы обратные потери были на одном уровне (стремимся к этому).

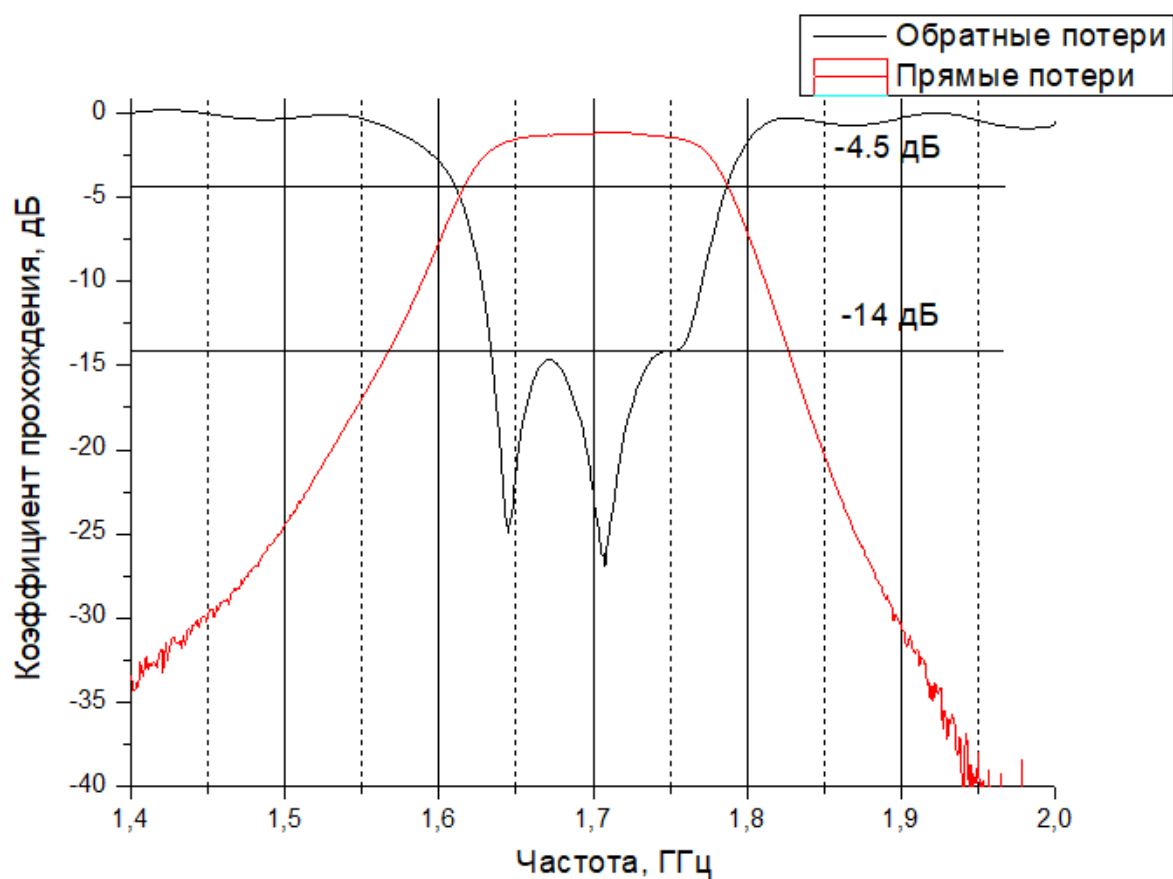


Рисунок 31 – АЧХ фильтра с измененным кондуктивным подключением

Таблица 8 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ
1.7	1.625	1.795	-14.96	-14.12

Из рисунка 31 видно, что правый минимум пропадает. Используем влияние скачка волнового сопротивления на 3 резонаторе, для понижения частоты резонатора, таким образом СВС позволяет прорезать спектр частот.

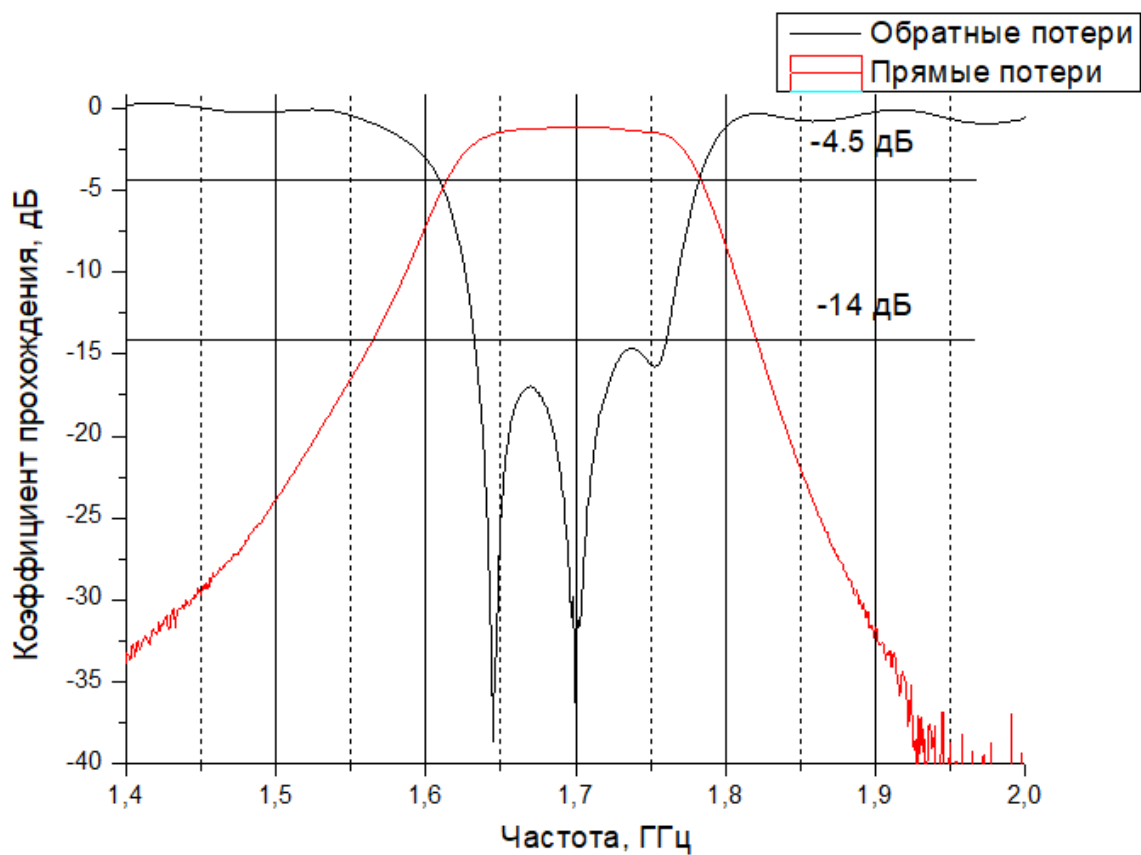


Рисунок 32 – АЧХ фильтра с СВС

Таблица 9 – Характеристики АЧХ фильтра

Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ
1.7	1.625	1.795	-17.53	-14.88

Из рисунка 32 видно, есть продвижения правого минимума. Делаем укорочение средней микрополосковой линии L_e с каждой стороны, чтобы обратные потери были на одном уровне (стремимся к этому).

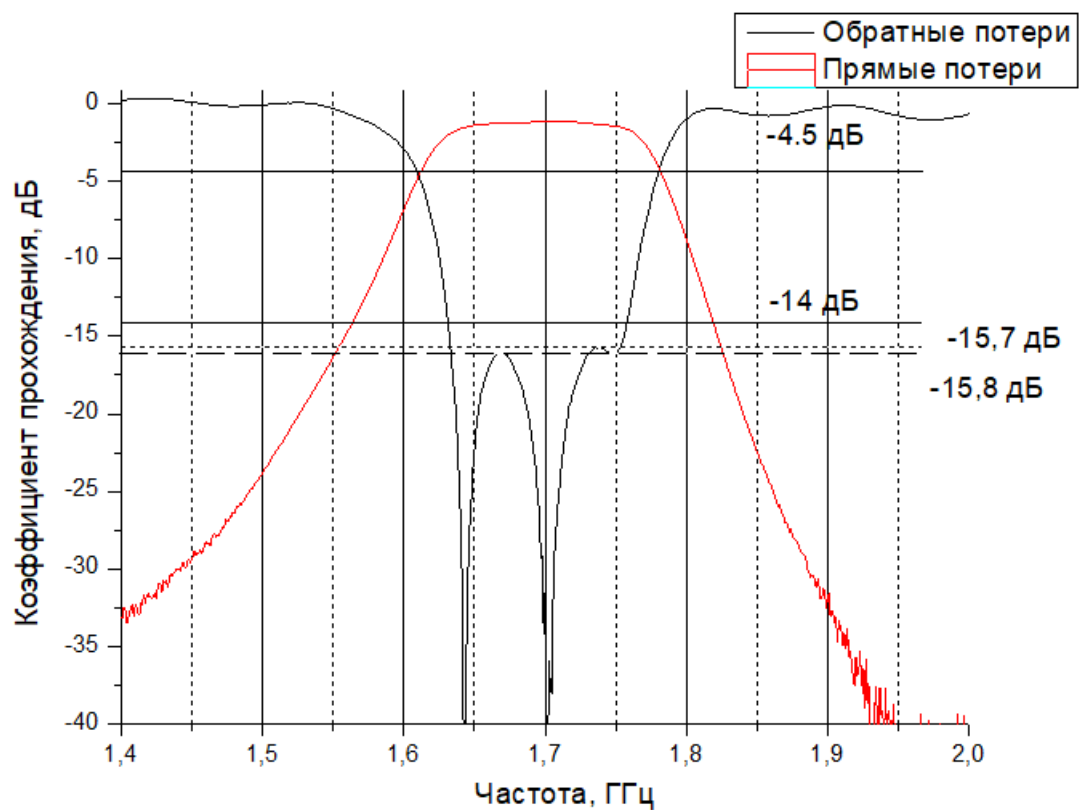


Рисунок 33 – Настроенная АЧХ фильтра

Из рисунка 33 видно, что центральная частота совпадает с ТЗ, минимумы обратных потерь находятся на одном уровне, и они находятся чуть ниже -14дБ.



Рисунок 34 – Макет трезвенного фильтра с СВС

ВЫВОД ПО СРАВНЕНИЮ

- 1) Совпадение резонансной частоты.
- 2) Несовпадение ширины полосы пропускания на 0.034 ГГц меньше;
- 3) Расчетная АЧХ отличается от экспериментальной меньшей высотой пиков обратных потерь на 1.11 левый минимум, 0.77 правый минимум

Это говорит о том, что взятая в расчетах добротность резонаторов $Q = 200$ на самом деле имеет меньшую величину. В дальнейшем проектировании подобных фильтров на данных подложках необходимо брать меньшую добротность.

Таким образом, АЧХ изготовленного макета фильтра считается не настроенным, так как ширина полосы пропускания не соответствует ТЗ.

Таблица 10 – Характеристики АЧХ фильтров расчетного и практического

Фильтр	Центральная частота, ГГц	Нижняя граница, ГГц	Верхняя Граница, ГГц	Левый минимум обратных потерь, дБ	Правый минимум обратных потерь, дБ	Ширина полосы пропускания ΔF
Экспериментальный	1.7	1.615	1.785	-15.8	-15.7	170
Расчетный	1.7	1,5938	1,802	-14,69	-14,93	204

6 Обеспечение безопасности труда и охраны здоровья

6.1 Общие требования охраны труда

Под техникой безопасности обучающихся в профессиональном образовательном учреждении подразумевается комплекс мероприятий организационного и технического характера, направленных на создание безопасных условий и предотвращение несчастных случаев в ходе образовательного процесса.

Задача охраны труда - свести к минимуму вероятность получения травм или заболевания работающего, обеспечить комфорт при трудовой деятельности. Охрана труда включает правовые, социально-экономические, организационные, технические, психофизиологические, санитарно-технические, лечебнопрофилактические, реабилитационные и иные мероприятия и средства.

За безопасность обучающихся на занятиях несет ответственность преподаватель, поэтому все педагогические работники должны быть обеспечены инструкциями по технике безопасной организации групповых и индивидуальных занятий.

Сотрудники и студенты должны соблюдать действующие в ТГУ правила внутреннего распорядка, графики работы, режим труда и отдыха

На рабочих местах запрещается:

- принимать пищу;
- курить, распивать алкогольные напитки, употреблять наркотические средства, психотропные или токсичные вещества;
- являться на работу в состоянии алкогольного опьянения либо в состоянии, вызванном употреблением наркотических средств, психотропных или токсичных веществ.

6.2 Требования охраны труда перед началом работ

Перед началом работы необходимо подготовить рабочее место, для этого необходимо навести порядок на рабочем месте, обеспечить достаточную освещенность, убрать все посторонние предметы и приборы. Нужно создать такие условия для работы, чтобы иметь оптимальный обзор всех приборов и установок, обеспечить доступность к их органам управления и возможность быстрого отключения приборов от электросети.

Перед началом работы на установках следует:

- ознакомьтесь с блок-схемой и принципом действия установки, на которой предстоит работать, а также с инструкциями по эксплуатации всех приборов, входящих в установку;
- убедиться в исправности кабелей электропитания, стыковочных соединений, коммутационного оборудования, защитных и блокировочных устройств;

- удостовериться в надежном заземлении устройств (при отсутствии трехпроводной сети электропитания);
- убедиться в исправности контрольных приборов;
- удостовериться в наличии средств индивидуальной защиты, приспособлений и инструментов, обеспечивающих безопасную работу;
- осуществлять включение установки в сеть только с разрешения преподавателя, ведущего занятия, после проведения им контрольного опроса о порядке включения, методике измерений и в порядке, определенном инструкцией по эксплуатации.

6.3 Требования охраны труда во время работы

Необходимо выполнять только порученную преподавателем работу. Не допускается одновременно выполнять или участвовать в выполнении других работ. Поэтому нельзя включать в сеть установки и приборы, не имеющие отношения к выполняемой работе.

Во время работы на экспериментальных установках следует:

- не прикладывать излишних усилий к органам управления приборов (все необходимые регулировки и подстройки осуществлять в полном соответствии с инструкцией по эксплуатации приборов);
- переставлять приборы, изменять коммутацию электрических цепей только при отключенном электрооборудовании;
- поддерживать порядок на рабочем месте, не загромождать его посторонними предметами (головные уборы, портфели, книги и пр.);
- коммутируя СВЧ тракты, понижать излучаемую в пространство электромагнитную энергию до безопасных пределов путем введения максимального затухания выходного аттенюатора или вовсе отключать генератор СВЧ;
- плотно стягивать фланцы волноводных узлов измерительного тракта болтами или струбцинами;
- при появлении в установке неисправностей или отклонений от нормальной работы приборов (отсутствие или периодическое пропадание сигналов, искрение, звук электрического разряда, появление дыма или запаха горелой изоляции) необходимо выключить установку и сообщить об этом ведущему преподавателю или дежурному инженеру. Повторное включение установки в сеть допускается лишь после проверки ее исправности ведущим преподавателем (дежурным инженером) и с его разрешения.

При работе на экспериментальных установках запрещено прикасаться к открытым токоведущим частям приборов и изменять электрическую коммутацию элементов

лабораторной установки при включенных источниках высокого напряжения. Также запрещается проверять наличие СВЧ мощности по тепловому эффекту на любой части тела и заглядывать в открытый конец СВЧ тракта при включенном источнике мощности.

При работе за компьютером, для предупреждения развития переутомления обязательными мероприятиями являются проведение упражнений для глаз через каждые 20-25 мин работы за ПЭВМ; проведение упражнений физкультминутки в течение 1-2 мин для снятия локального утомления, которые выполняются индивидуально при появлении начальных признаков усталости.

6.4 Требования охраны труда в аварийных ситуациях

В случае возникновения аварийной ситуации, представляющей реальную опасность для жизни работающих, необходимо отключить все оборудование общим выключателем и, соблюдая порядок и спокойствие, принять меры по обеспечению эвакуации людей. При возникновении неполадок в работе оборудования или приборов нужно незамедлительно сообщить преподавателю.

При травмировании сотрудника или студента следует оказать ему первую (доврачебную) помощь, при необходимости, вызвать скорую помощь, и немедленно уведомить ответственного преподавателя.

При возникновении несчастного случая с поражением электрическим током необходимо быстро обесточить установку и оказать первую помощь пострадавшему (вызвать скорую помощь).

В случае возникновения пожара необходимо:

- сообщить об этом в пожарную часть по телефону 01 (с мобильного телефона 101), по возможности принять меры по максимальному обеспечению безопасности людей, а также принять меры по тушению пожара и сохранности оборудования с использованием первичных средств пожаротушения (пламя гасить в зависимости от его происхождения: песком, огнетушителем, покрывалом для изоляции очага возгорания) и соблюдать меры безопасности;

- к тушению пожара приступить только в случае отсутствия явной угрозы жизни и наличия возможности покинуть опасное место в любой момент.

При возгорании электроустановок они должны быть немедленно отключены. Запрещается применять воду для тушения горящих приборов и оборудования, находящихся под напряжением до 1000 В. Для тушения электроустановок под напряжением предназначены углекислотный и порошковый огнетушитель.

6.5 Требования охраны по окончанию работы

По окончании работы необходимо отключить все устройства, кроме работающих в непрерывном режиме, от электросети, навести порядок на рабочем месте и сообщить преподавателю об окончании работы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были изучены условия оптимальной настройки фильтра, изучено руководство пользователя установки «Скальпель-96», проведены расчёты фильтра по техническому заданию с использованием специальных программ, проведено изготовление фильтра на установке «Скальпель-96», настройка макета фильтра и сравнение АЧХ рассчитанного и экспериментального фильтра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе. Препринт №415Ф / Б.А. Беляев, В.В. Тюрнев, А.К. Елисеев, Г.М. Рагзин / Красноярск: ИФ СО РАН, 1987. 27 с.
- 2 Беляев Б.А Препринт №652Ф. Двухзвенный микрополосковый СВЧ фильтр. Часть 1 / Б.А. Беляев, В.В. Тюрнев / Красноярск, 1990. 31 с.
- 3 Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе: Препринт №415Ф / Б. А. Беляев, В. В. Тюрнев, А. К. Елисеев. – Красноярск: Институт физики имени им. Л.В. Киренского СО РАН, 1987. 23 с
- 4 Физические аспекты оптимальной настройки микрополосковых фильтров: Препринт №768Ф / Б. А. Беляев, А. В. Казаков, М. И. Никитина, В. В. Тюрнев. – Красноярск: Институт физики имени им. Л.В. Киренского СО РАН, 1987. 41 с..
- 5 Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе: Препринт №448Ф / Б. А. Беляев, В. В. Тюрнев, А. К. Елисеев. – Красноярск: Институт физики имени им. Л.В. Киренского СО РАН, 1987. 23 с.
- 6 <https://electro.mashinform.ru/folgirovannye-sloistye-plastiki/dielektrik-folgirovannyj-marki-flan-m-obj4430.html>

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: alexha251198@bk.ru / ID: 7816290
Проверяющий: alexha251198@bk.ru / ID: 7816290
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - [user.antiplagiat.ru](https://antiplagiat.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 21
Начало загрузки: 19.01.2022 07:50:33
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: Діплом Копіюлов.pdf
Название документа: Діплом Копіюлов
Размер текста: 53 кб
Символов в тексте: 54265
Слов в тексте: 6164
Число предложений: 332

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 19.01.2022 07:50:36
Длительность проверки: 00:00:04
Комментарий: не указано
Модули поиска: Интернет Free

ЗАЙМСТВОВАНИЯ
11.94%

САМОЦИТИРОВАНИЯ
0%

ЦИТИРОВАНИЯ
0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
88.06%



Винюченський І.В.