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
«23» января 2023 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА МАКЕТА ТРЕХЗВЕННОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА НА ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ НА ЧАСТОТУ 2 ГГц ПО ТЗ

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

Малыхин Максим Александрович

Руководитель ВКР
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ В.А. Журавлёв
«__» января 2023 г.

Автор работы
студент группы № 778
_____ М.А. Малыхин

Томск-2023

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
« 20 » декабря 2022 г.

ЗАДАНИЕ
на подготовку ВКР специалиста
студенту 778 группы Малыхину Максиму Александровичу

1. Тема ВКР: Разработка, изготовление и настройка макета трехзвенного микрополоскового фильтра на четвертьволновых резонаторах на частоту 2 ГГц по ТЗ

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:
а) на кафедре 20.01.2023,
б) в ГЭК 01.02.2023.

3. Краткое содержание работы:

Работа направлена на разработку, изготовление и настройку макета трехзвенного микрополоскового фильтра на четвертьволновых резонаторах на частоту 2 ГГц по ТЗ. Включает виртуальное моделирование, проектирование макета и его настройку.

4. Календарный график выполнения ВКР:

а) обзор литературы по проблеме курсовой работы	22.12.2022 – 28.12.2022
б) моделирование макета фильтра в Microwave Office	24.12.2022 – 28.12-2022
в) изготовление макета фильтра и его настройка	24.12.2023 – 16.01-2023
г) написание ВКР и сдача в ГЭК	12.01.2023 – 01.02-2023
д) размещение текста ВКР в электронной библиотеке ТГУ	26.01.2023 – 29.01.2023

5. Дата выдачи задания «20» декабря 2022 г.

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры радиоэлектроники _____ В.А. Журавлёв

Задание принял к исполнению _____ М.А. Малыхин

РЕФЕРАТ

Отчет 42 страниц, 5 главы, 17 рисунков, 7 источников.

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ, ТРЕХЗВЕННЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ФИЛЬТР, ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ.

Объектом исследования является макет трехзвенного микрополоскового фильтра на четвертьволновых резонаторах.

Цель работы – аналитический расчёт параметров, разработка и настройка трехзвенного микрополоскового фильтра по ТЗ на четвертьволновых резонаторах, а также сравнение площади топологии и АЧХ микрополосковых фильтров на четвертьволновых и полуволновых резонаторах.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1 Теоретическая часть 6

1.1 Основные характеристики фильтров нижних, верхних частот и полосно-пропускающих 6

1.2 Основные параметры, описывающие АЧХ фильтров 6

1.3 Микрополосковая линия передачи 7

1.4 Понятие эффективной диэлектрической проницаемости 8

1.5 Добротность микрополоскового резонатора 8

1.6 Микрополосковый резонатор и структура полей для первых двух типов колебаний 9

1.7 Практическое применение микрополосковых фильтров 12

1.8 Определение коэффициента связи 13

1.9 Фильтры на полуволновых и четвертьволновых микрополосковых резонаторах 14

2 Основные условия настройки трехзвенного фильтра на микрополосковых резонаторах 17

2.1Расчёт длины резонатора 18

2.2 Моделирование микрополоскового трехзвенного фильтра в программной среде AWR Microwave Office 20

3 Практическая часть 24

3.1 Техническое задание. 24

3.2 Алгоритм изготовления 25

3.3 Настройка фильтра 25

4 Сравнение фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах 31

4.1 Сравнение площадей топологии фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах 31

4.2 Сравнение АЧХ фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах 33

5 Обеспечение безопасности труда и охраны здоровья 37

5.1 Общие требования охраны труда 37

5.2 Требования охраны труда перед началом работ 37

5.3 Требования охраны труда вовремя работы 38

5.4 Требования охраны труда в аварийных ситуациях 39

5.5 Требования охраны по окончанию работы 40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 41

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ 42

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, важнейшими устройствами современных радиотехнических систем передачи, приема и обработки сигналов являются полосно-пропускающие фильтры, от которых зависит не только качество радиоаппаратуры, но и нередко ее габариты и даже цена. Поэтому разработка новых миниатюрных конструкций фильтров, обладающих низкой стоимостью при массовом производстве, является важной и актуальной задачей [5].

Микрополосковые фильтры получили достаточно широкое распространение в аппаратуре СВЧ за счет таких преимуществ, как высокие селективные свойства, миниатюрность, простота изготовления и хорошее совпадение расчетных характеристик с измеренными. Микрополосковые фильтры используются в спутниковой системе связи, радиолокационной аппаратуре, системы сотовой связи, телевидение. Фильтры СВЧ также находят применение в измерительной аппаратуре и системах диагностики и контроля. Не редко от фильтров зависят такие важнейшие параметры аппаратуры в целом как чувствительность, помехоустойчивость, габариты, вес. В данное работе будет произведена миниатюризация микрополоскового фильтра путем замыкания полосок микрополоскового резонатора (МПР) на экран.

1 Теоретическая часть

1.1 Основные характеристики фильтров нижних, верхних частот и полосно-пропускающих

Известно, что фильтрами называют устройства, осуществляющие частотную селекцию электромагнитных сигналов, заключающуюся в подавлении помех полезному сигналу при его приеме и передаче. На сегодняшний день известно достаточно большое количество различных конструкций фильтров. В зависимости от рабочего диапазона электромагнитного спектра условно различают рентгеновские фильтры, ультрафиолетовые фильтры, светофильтры, тепловые фильтры, сверхвысокочастотные (СВЧ) фильтры, радиотехнические фильтры, а также фильтры ультразвуковых, звуковых и инфразвуковых частот.

Трехзвенный микрополосковый фильтр – фильтр, содержащий три полосковых проводника, которые вместе с подложкой и экраном образуют три полуволновых микрополосковый резонатор (МПР), электромагнитно связанных не по всей длине.

Микрополосковые фильтры получили достаточно широкое распространение в аппаратуре СВЧ за счет таких преимуществ, как высокие селективные свойства, миниатюрность, простота изготовления и хорошее совпадение расчетных характеристик с измеренными. Такие фильтры могут изготавливаться методом фотолитографии или гравировки по лаку. При этом требование к точности фотолитографии и качеству обработки подложек значительно ниже, чем у фильтров на поверхностных акустических волнах [2].

1.2 Основные параметры, описывающие АЧХ фильтров

Это минимальные потери L_0 и допустимы относительный уровень затухания L_{pass} в полосе пропускания, частоты нижней $f_{1\ pass}$ верхней $f_{h\ pass}$ границ, а также минимальные обратные потери R_{min} в полосе пропускания.

Границы нижней и верхней полос заграждения $f_{1\ stop}$ и $f_{h\ stop}$ определяются заданными уровнями затухания $L_{1\ stop}$ и $L_{h\ stop}$ (Рисунок 1, а).

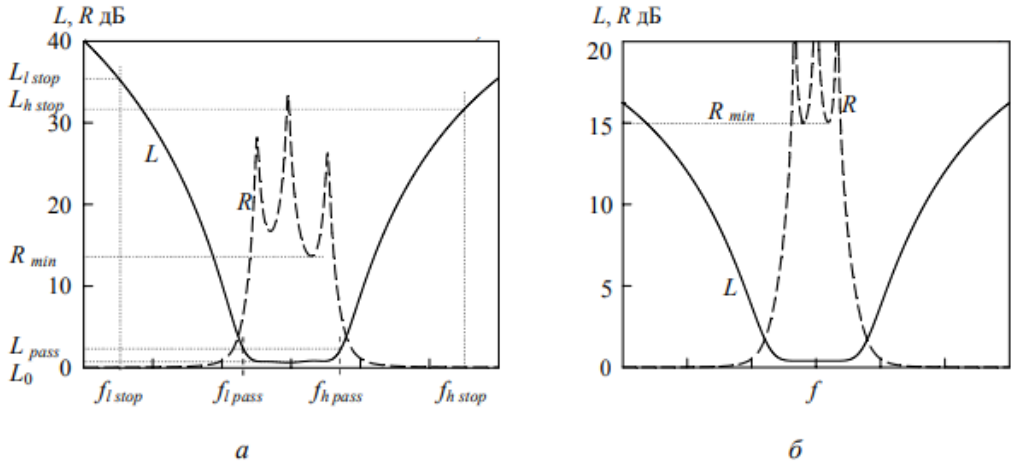

Рисунок 1 – Основные параметры АЧХ фильтра [1]

Оптимальной АЧХ будем называть такую АЧХ, в которой число пиков функции обратных потерь *R(f)* в полосе пропускания совпадает с числом микрополосковых резонаторов конструкции *n*, а глубина всех минимумов *R*, (*I* = 1, 2, .., *n*–1), расположенных между этими пиками, равна заданной величине R_{min}. Пример АЧХ оптимально настроенного трехзвенного фильтра с R_{min} = 15 (Рисунок 1, б).

1.3 Микрополосковая линия передачи

Микрополосковая линия передачи (МПЛ) – это прибор, состоящий из двух металлических проводников, выполненных в виде полоскового проводника и экрана на обеих сторонах подложки с диэлектрической проницаемостью ε и высотой *H (*рисунок 2, а).

1.4 Понятие эффективной диэлектрической проницаемости

При нулевой толщине полоскового проводника, в квазистатической области частот с приемлемой точностью можно использовать следующие формулы для вычисления основных характеристик микрополосковой линии:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{(\varepsilon+1)}{2} + \frac{V(\varepsilon-1)}{2}, \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+12H}{W}}} \text{ при } W \geq H, \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+12H}{W}}} + 0.04 \cdot \left(\frac{1-W}{H}\right)^2 \text{ при } W \geq H. \quad (3)$$

Величина ε_{eff} называется эффективной диэлектрической проницаемостью. Так как микрополосковая линия передачи является линией открытого типа, часть СВЧ мощности распространяется в подложке, между полосковым проводником и экраном, а часть мощности – в воздухе, вблизи полоскового проводника. В результате чего скорость электромагнитной волны в микрополосковой линии определяется как значением диэлектрической проницаемости подложки, так и диэлектрической проницаемости воздуха. Поэтому скорость распространения и, соответственно, длина электромагнитной волны в микрополосковой линии передач определяются некой эффективной диэлектрической проницаемостью.

1.5 Добротность микрополоскового резонатора

Добротность произвольной колебательной системы – это безразмерная величина Q, определяемая по формуле (4):

$$Q = \frac{\omega w}{P}, \quad (4)$$

где ω – частота колебаний;

w – запасенная системой энергия;

P – усредненная по времени мощность потерь.

Для резонаторов, которые следует рассматривать как колебательную систему, одной из важнейших характеристик является нагруженная добротность *Q*, обратную величину которой можно найти по формуле:

$$Q^{-1} = Q_0^{-1} + Q_e^{-1} \tag{5}$$

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:

$$Q_0 = \frac{1}{tg\ \delta + (\frac{\Delta}{H})}, \tag{6}$$

где *tg* δ – тангенс угла диэлектрических потерь материала подложки;

Δ – глубина скин-слоя в металлической полоске;

H– высота диэлектрической подложки.

1.6 Микрополосковый резонатор и структура полей для первых двух типов колебаний

Простейшим микрополосковым фильтром может служить одиночный микрополосковый резонатор (МПР). Он представляет собой отрезок регулярной микрополосковой линии (МПЛ) передачи открытого типа,

состоящий из двух плоских металлических проводников, выполненных в виде полоскового проводника и экрана на обеих сторонах подложки с диэлектрической проницаемостью ε и высотой H (рисунок 2, а).

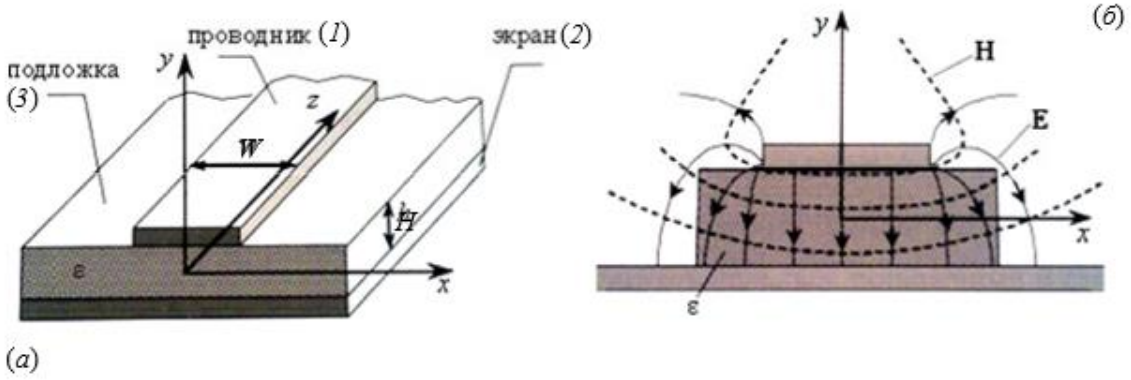

Рисунок 2 – Микрополосковая линия (*а*) и структура поля в ней (*б*) [1]

Распределение амплитуд высокочастотных магнитного поля H и электрического поля E (Рисунок 2, б). Видно, что структура поля в микрополосковой линии имеет достаточно сложный характер. 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 воздух ($\varepsilon = 1$) – диэлектрик (ε не равно 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.

Распределение напряжений и токов (или электрического и магнитного полей) для первой и второй моды колебаний по длине резонатора приведено на рисунке 3.

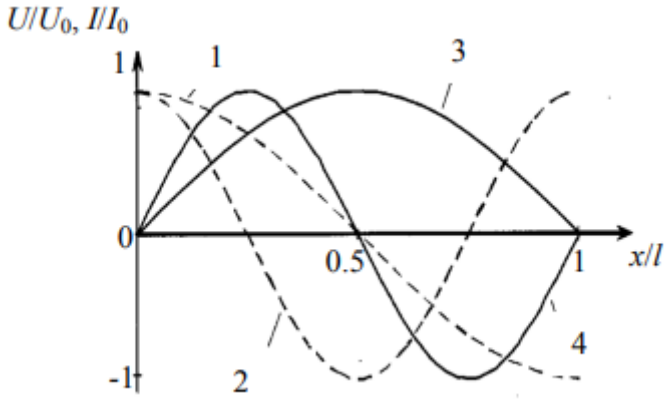

Рисунок 3 – Распределение высокочастотного напряжения (1, 2) и высокочастотного тока (3, 4) по длине резонатора с разомкнутыми концами для первой (1, 3) и второй (2, 4) моды колебаний [1]

Анализируя рисунок 3, можно сказать, что на резонансных частотах по длине резонатора (l) укладывается целое число (m) полуволн (λ/2):

$$l = \frac{m\lambda}{2}, \tag{7}$$

где m – номер продольной моды, $F = \frac{\omega}{2\pi}$ –частота, $\lambda = \frac{c}{F\sqrt{\varepsilon_{eff}}}$ – длинна волны в МПЛ.

Отсюда резонансная частота m-й продольной моды резонатора:

$$F_m = \frac{mc}{2l\sqrt{\varepsilon_{eff}}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что резонансные частоты высших продольных мод МПР с разомкнутыми концами кратны нижайшей 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.

1.7 Практическое применение микрополосковых фильтров

В настоящее время микрополосковые фильтры получили достаточно широкое распространение в аппаратуре СВЧ за счет ряда преимуществ: высокие селективные свойства, миниатюрность, простота изготовления и хорошее совпадение расчетных характеристик с измеренными. Такие фильтры могут изготавливаться методом фотолитографии или гравировки по лаку. При этом требование к точности фотолитографии и качеству обработки подложек значительно ниже, чем у фильтров на поверхностных акустических волнах.

Рассмотрим последовательность изготовления микрополосковых фильтров методом гравировки по лаку. Для изготовления фильтра обычно используется диэлектрическая подложка из высокодобротной керамики (Рисунок 2, а и рисунок 4) толщиной H = 0,5…2 мм с двухсторонним напылением меди. Верхняя сторона подложки покрывается защитным слоем специального лака и автоматизированный координатограф «Скальпель-07»

прорезает по лаку предварительно рассчитанный рисунок линий. Затем с мест, подлежащих травлению, лак механически удаляется, а остается он только там, где должны быть медные микрополосковые проводники резонаторов фильтра. Затем происходит травление незащищенных участков раствором хлорного железа. Толщина проводников в несколько раз больше глубины скин-слоя металла. Нижняя сторона подложки остается полностью металлизированной и припаивается на заземляемое основание (экран). В качестве примера показан трехзвенный (состоящий из трех звеньев-резонаторов) микрополосковый фильтр (Рисунок 4) [1].

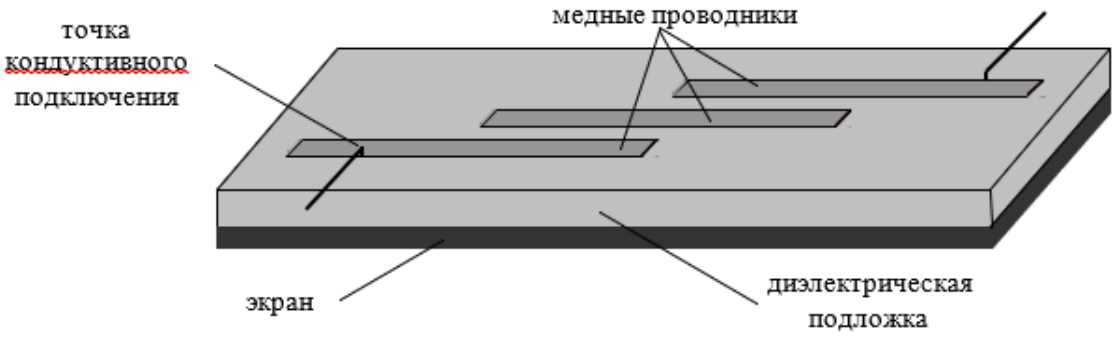

Рисунок 4 – Топология проводников и конструкция трехзвенного лестничного микрополоскового фильтра [1]

1.8 Определение коэффициента связи

Как известно, взаимодействие двух произвольных резонаторов, имеющих близкие собственные частоты, приводит к появлению связанных колебаний в них и к «расталкиванию» их резонансных частот. Количественно степень взаимодействия резонаторов характеризуется коэффициентом связи k, который для двух МПР получается обобщением выражений коэффициентов связи двух колебательных контуров. Коэффициент связи двух колебательных контуров с элементами L_1, C_1, L_2, C_2 равен:

$$k_L = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (9)$$

в случае индуктивной связи

$$k_c = \frac{C_{12}}{\sqrt{(C_1+C_{12})(C_2+C_{12})}}. \quad (10)$$

В случае емкостной связи, где L_{12} – взаимная индуктивность связи, а C_{12} – емкость связи [2].

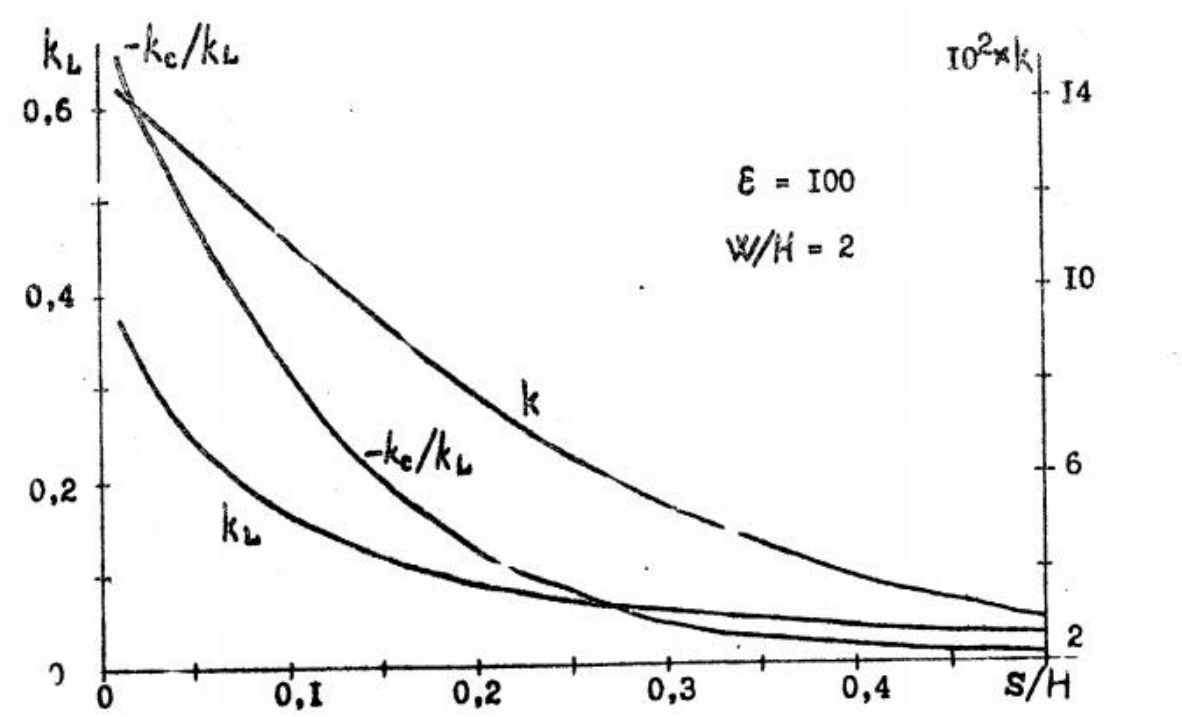

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента связи МПР от расстояния между их полосками [2]

1.9 Фильтры на полуволновых и четвертьволновых микрополосковых резонаторах

Целью прошлогодней курсовой работы являлись: разработка, изготовление и настройка макета трехзвенного микрополоскового фильтра на полуволновых резонаторах на частоте 2 ГГц по ТЗ. В результате работы был изготовлен трехзвенный микрополосковый фильтр со сдвигом крайних резонаторов (рисунок 6). Сдвиг крайних резонаторов относительно

центрального позволяет получить симметричную относительно центральной частоты фильтра АЧХ.

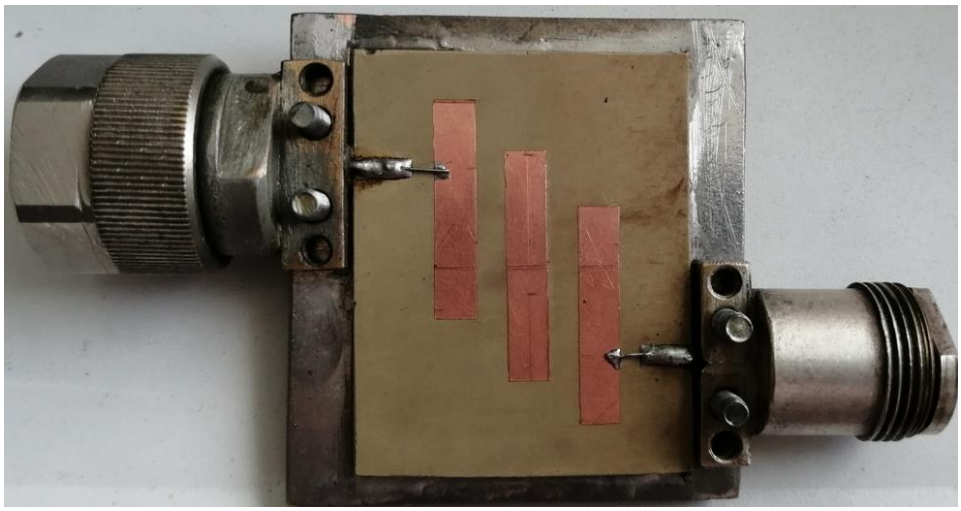

Рисунок 6 – Макет трехзвенного полуволнового микрополоскового фильтра

Изготовленное изделие имеет параметры, приведенные в таблице 1 и 2.

Таблица 1 – Параметры АЧХ полуволнового микрополоскового фильтра

Параметры АЧХ	Значения
Центральная частота (f_0)	2 ГГц
Ширина полосы пропускания	240 МГц
Коэффициент прохождения L_0	-0,88 дБ ± (0,22) дБ
Минимумы обратных потерь R_{min}	-15,5 дБ ± (1,69) дБ

Таблица 2 – Параметры топологии полуволнового микрополоскового фильтра

Параметры топологии	Значения
Диэлектрическая проницаемость ε	16,5
Ширина резонаторов W	4 мм
Длина резонаторов L_r	20,95 мм
Расстояние между резонаторами S	3,2 мм
Расстояние точек подключения L_c	6,85 мм
Расстояние от края до первого полоска L_a	10,3 мм

Фильтры на четвертьволновых МПР менее технологичны в изготовлении, так как требуют замыкания полосок МПР на экран. Однако эти фильтры отличаются рядом преимуществ по сравнению с фильтрами на полуволновых МПР. Они существенно миниатюрнее и, как правило, обладают более высокими селективными свойствами при одинаковом количестве звеньев в устройстве. У четвертьволновых резонаторов в спектре собственных колебаний отсутствуют все четные моды, поэтому у фильтров на их основе не существует четных, паразитных полос пропускания [6].

2 Основные условия настройки трехзвенного фильтра на микрополосковых резонаторах

Моделирование и насройка фильтра выполнялась с помощью методического пособия “Физические аспекты оптимальной настройки микрополосковых фильтров” под редакцией Беляева Б.А., Казакова А.В., Никитина М.И., Тюрнева В.В.

Настраивая микрополосковый трехзвенный фильтр по ТЗ мы полагались на четыре основных условия:

1 . Совпадение центральной частоты полосы пропускания с заданной величиной $(F_{lpass}+F_{hpass})/2$. Резонансные частоты МПР обратно пропорциональны их длине l_r. Поэтому настройка центральной частоты на заданную производится путем пропорционального изменения длин l_r всех полосковых проводников. Причем для понижения центральной частоты следует увеличить длину резонаторов, а для повышения – укоротить.

2 . Совпадение ширины полосы пропускания с заданной (F_{hpass} -F_{lpass}). Величина расщепления резонансных частот взаимодействующих МПР, а следовательно ширина полосы пропускания фильтра пропорциональна коэффициенту связи резонаторов k. Поэтому для настройки ширины полосы пропускания следует производить те операции, которые влияют на коэффициент k. К числу таких операций прежде всего относится изменение зазора между полосковыми проводниками S. При этом увеличение S приводит к уменьшению полосы пропускания и наоборот. В меньшей степени шириной полосы пропускания можно управлять изменением ширины полосковых проводников w. Увеличение w также приводит к уменьшению ширины полосы пропускания и наоборот.

3 . Равенство среднего значения минимумов обратных потерь $(R_1+R_2)/2$ заданной 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. 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.

4 . Равенство минимумов обратных потерь 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. При $R_1>R_2$ следует понизить резонансную частоту внутреннего МПР.

2.1 Расчёт длины резонатора

Для расчёта длины резонатора необходимо знать:

а) относительную диэлектрическую проницаемость подложки ε;

б) толщину подложки d (мм);

в) ширину полоски W (мм);

г) центральную частоту f_0 (ГГц);

д) скорость света в свободном пространстве c (м/с).

Неизменяемые параметры:

а) ε = 8,6;

б) Q = 200;

в) H = 2 мм;

г) W = 4 мм;

д) f_0 = 2±0,02 ГГц;

е) c = $3*10^8$ м/с;

ж) Zi = 150 Ом;

з) Li = 2мм.

Для расчета длины резонатора нам нужно рассчитать ε_{eff} и воспользоваться формулой 1:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{8{,}6+1}{2} + \frac{\frac{1}{\sqrt{7}}(8{,}6-1)}{2} \approx 6{,}23.$$

$$Lr = \frac{cm}{3f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \approx 20 \text{ мм}.$$

При расчете трехзвенного фильтра в программе AWR Microwave Office была подобрана более точная длина резонатора L_r = 14,73 мм.

2.2 Моделирование микрополоскового трехзвенного фильтра в программной среде AWR Microwave Office

Принципиальная схема трехзвенного фильтра на четвертьволновых резонаторах представлена на рисунке 7.

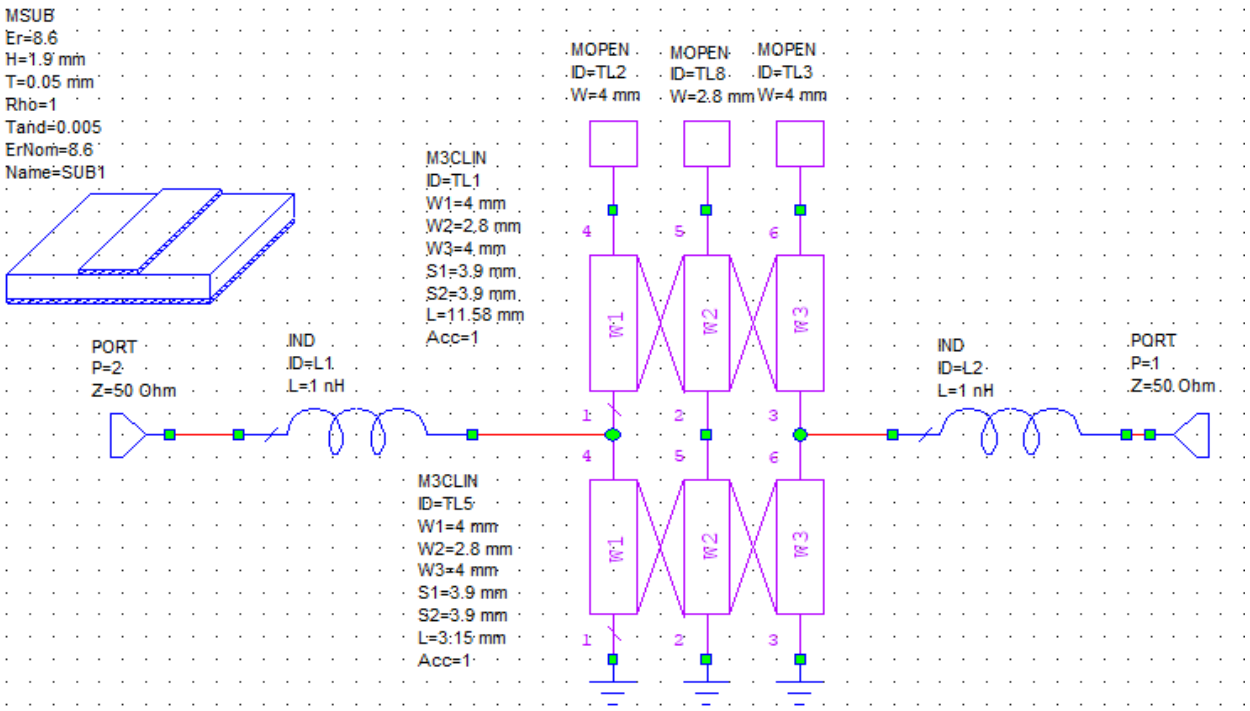

Рисунок 7 – Принципиальная схема трехзвенного фильтра на четвертьволновых резонаторах в программе AWR Microwave Office

АЧХ моделирования микрополоскового трехзвенного фильтра представлена на рисунке 8.

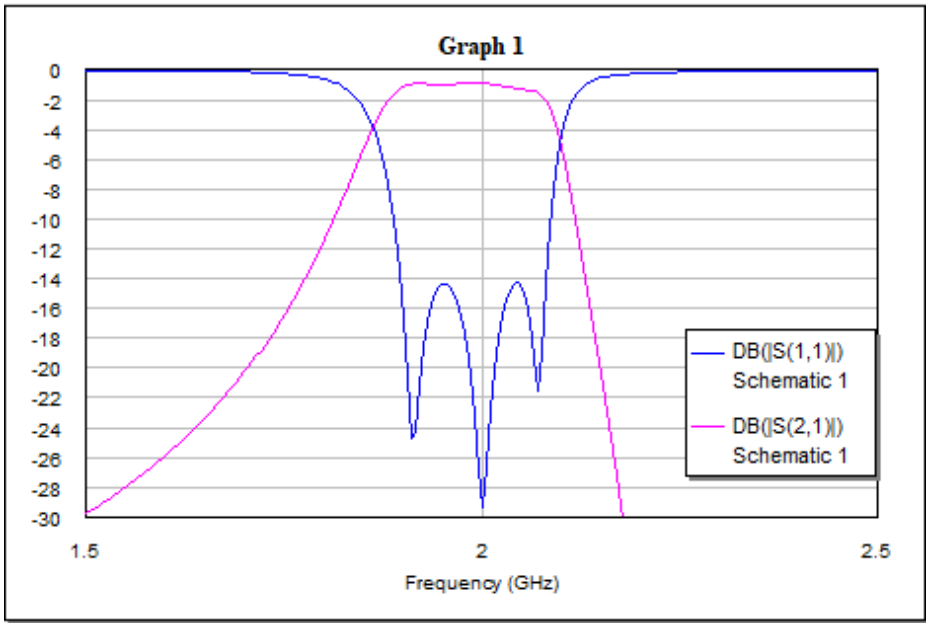

Рисунок 8 – АЧХ моделирования микрополоскового трехзвенного фильтра в программе AWR Microwave Office

Параметры АЧХ:

а) частота нижней границы на уровне 3дБ (F_{1pass} = 1,86 ГГц);

б) частота верхней границы на уровне 3дБ (F_{hpass} = 2,1 ГГц);

в) ширина полосы пропускания ΔF = 240МГц;

г) минимальные обратные потери (для левого минимума R_{min} = -14,4 дБ, для правого минимума R_{min} = -14,35 дБ);

д) центральная частота полосы пропускания (F_0 =2 ГГц).

Топология трехзвенного фильтра на четвертьволновых резонаторах представлена на рисунке 9.

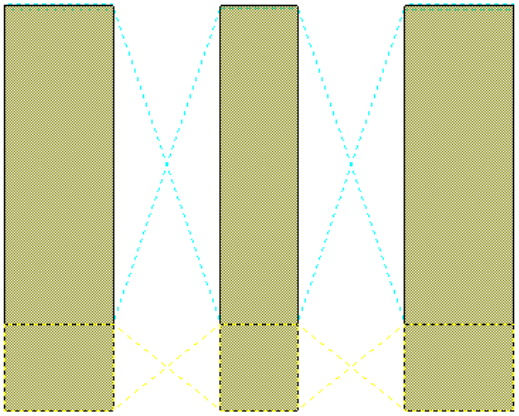

Рисунок 9 – Топология трехзвенного фильтра на четвертьволновых резонаторах в программе AWR Microwave Office

Основные параметры топологии трехзвенного фильтра на четвертьволновых резонаторах:

1) зазор между резонаторами S=3,9 мм;

2) расстояние подключения перемычки L_c = 3,15 мм;

3) длина резонатора L_r = 14,73 мм;

4) ширина центрального МПР W =2,8 мм;

5) ширина крайних полосковых проводников W =4 мм.

Чтобы настройка была более точной, полученные результаты измерений вносились в программу ORIGIN, где строились более информативные зависимости. Пример такой зависимости представлен на рисунке 10.

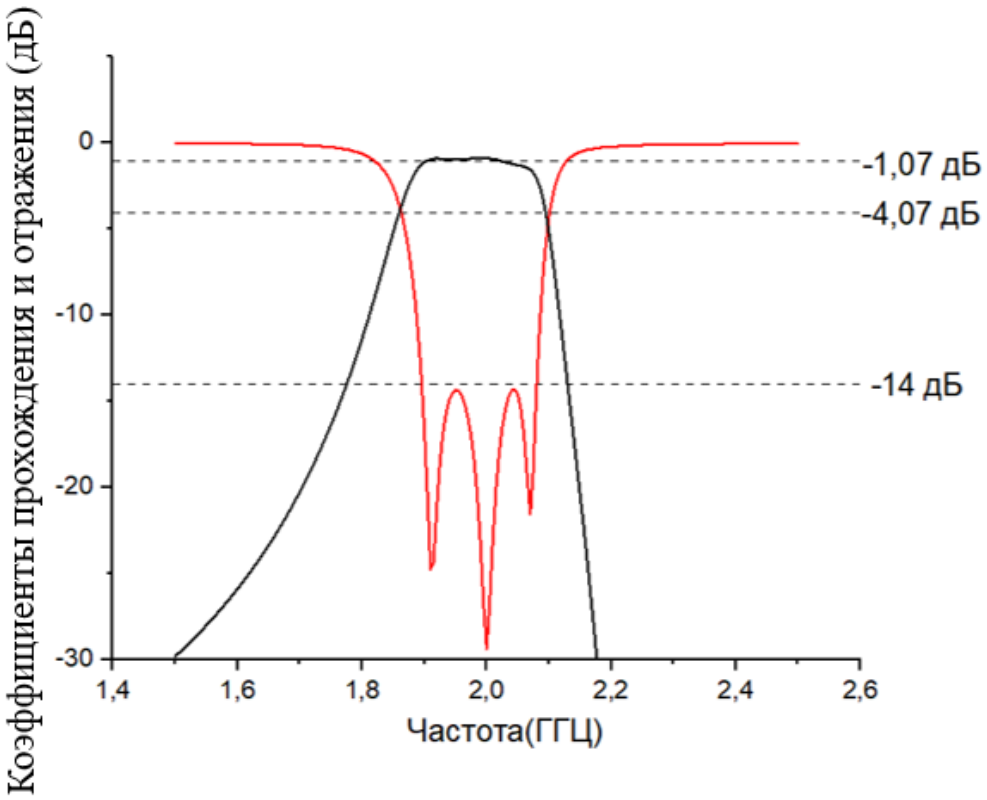

Рисунок 10 – АЧХ моделирования микрополоскового трехзвенного фильтра, построенная в программе ORIGIN

Здесь можно пронаблюдать соответствие параметров модели фильтра с ТЗ:

- центральная частота полосы пропускания f_0=2.0±0.03 ГГц;
- относительная ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ $\Delta f/f_0$= (12±0.1) %(240MHz±2MHz);
- уровень максимумов потерь на отражение в полосе пропускания –14 дБ.

Можно сделать вывод что настройка фильтра выполнена корректно, и соответствует всем условиям ТЗ.

3 Практическая часть.

3.1 Техническое задание.

а) центральная частота полосы пропускания f_0=2.0±0.03 ГГц;

б) относительная ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ $\Delta f/f_0$= (12±0.1) %;

в) уровень максимумов потерь на отражение в полосе пропускания –14 дБ;

Неизменяемые параметры:

а) диэлектрическая проницаемость подложки – ε = 8,6;

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=2мм;

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, 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 $R_1<R_2$ – понизить).

3.2 Алгоритм изготовления

Рассмотрим последовательность изготовления микрополосковых фильтров методом гравировки по лаку.

Создание макета происходило следующим образом:

а) подготовка 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) вырезка микрополосок (в данный этап входит нанесение лака на подложку, вырезание технической бритвой топологии и удаление лишнего лака);

г) вытравка микрополосок (в данном этапе с помощью хлорида железа вытравливали металлизацию вокруг микрополосок);

д) подсоединение точек подключения;

е) настройка характеристик и снятие АЧХ;

ж) заземление МПР на подложку при помощи латунной пластинки.

3.3 Настройка фильтра

Настройка фильтра проводилась с помощью измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-04 фирмы «Микран», работающего в диапазоне частот 0,01 до 4 ГГц. После часового прогрева прибора проводилась его калибровка в соответствии с инструкцией [3,4], а после этого проводились измерения.

АЧХ фильтра при первом измерении представлена на рисунке 11.

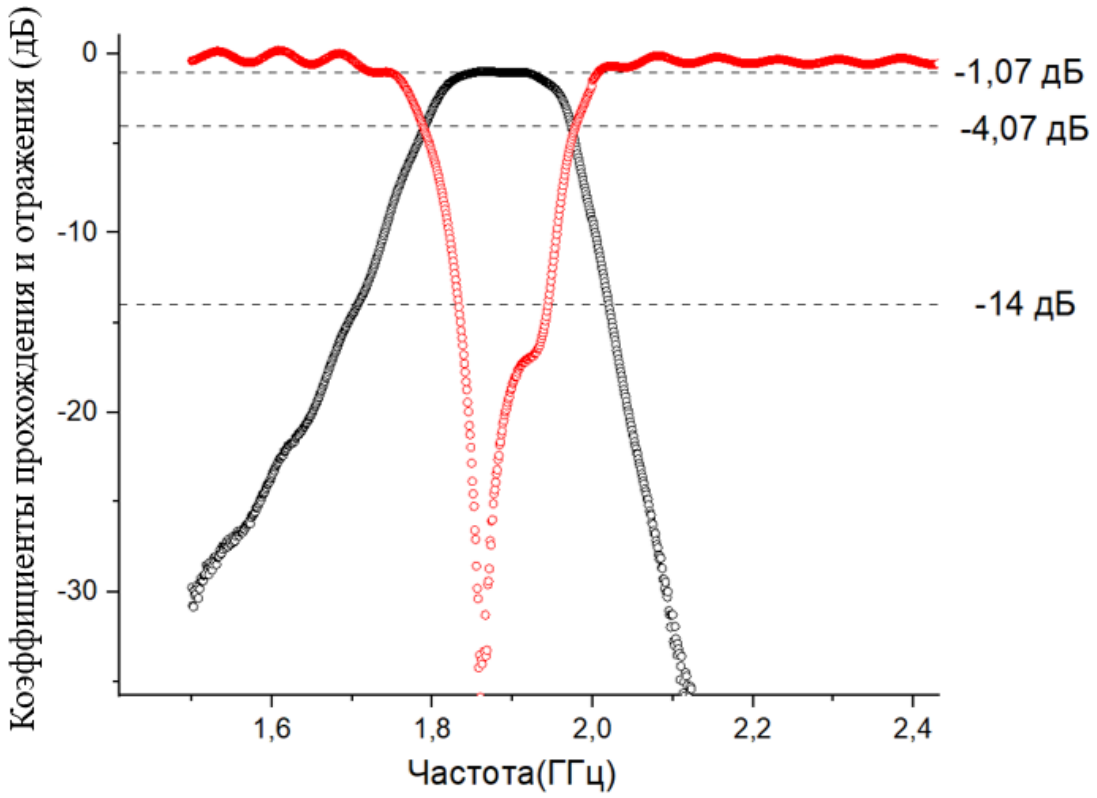

Рисунок 11 – АЧХ фильтра при первом измерении

В таблице 3 приведены основные параметры АЧХ фильтра.

Таблица 3 – Основные параметры АЧХ фильтра

F_0, ГГц	$(F_{hpass} - F_{lpass})$, МГц	L_0, дБ	R_{min}, дБ
1,833	192	-1,05	-17

Из рисунка 11 видно, что центральная частота не соответствует ТЗ, необходимо равномерно укорачивать МПР. большая величина обратных потерь, значит маленький коэффициент отражения, необходимо получить чуть меньше -14 дБ обратных потерь. Ширина полосы пропускания так же не соответствует ТЗ из-за под травления под лак, в процессе изготовления фильтра. Необходимо настроить величину обратных потерь, для этого нужно ослабить величину кондуктивного подключения L_c.

Промежуточные АЧХ при настройке фильтрана рисунке 12.

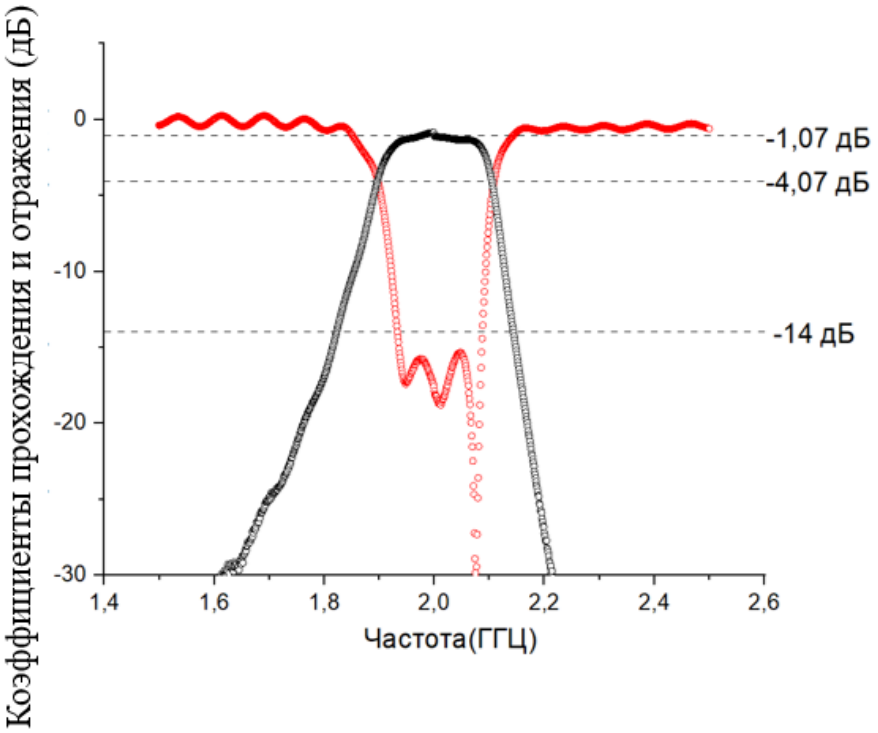

Рисунок 12 – Промежуточные АЧХ при настройке фильтра

В таблице 4 приведены основные параметры АЧХ фильтра.

Таблица 4 – Основные параметры АЧХ фильтра

F_0, ГГц	$(F_{hpass} - F_{lpass})$, МГц	L_0, дБ	R_{min}, дБ
2	221	-1,05	-15.7

Из рисунка 12 видно, что центральная частота соответствует ТЗ, большая величина обратных потерь, значит маленький коэффициент отражения, необходимо получить чуть меньше -14 дБ обратных потерь. Необходимо настроить величину обратных потерь, для этого нужно ослабить величину кондуктивного подключения L_c.

В таблице 5 приведены изменяемые параметры топологии фильтра.

Таблица 5 – Настройка параметров фильтра

Номер измерения	**Изменяемые параметры топологии**
1	*Lc* = 2.3 мм
2	*Lc* = 2.2 мм

Промежуточные АЧХ при настройке фильтрана рисунке 13.

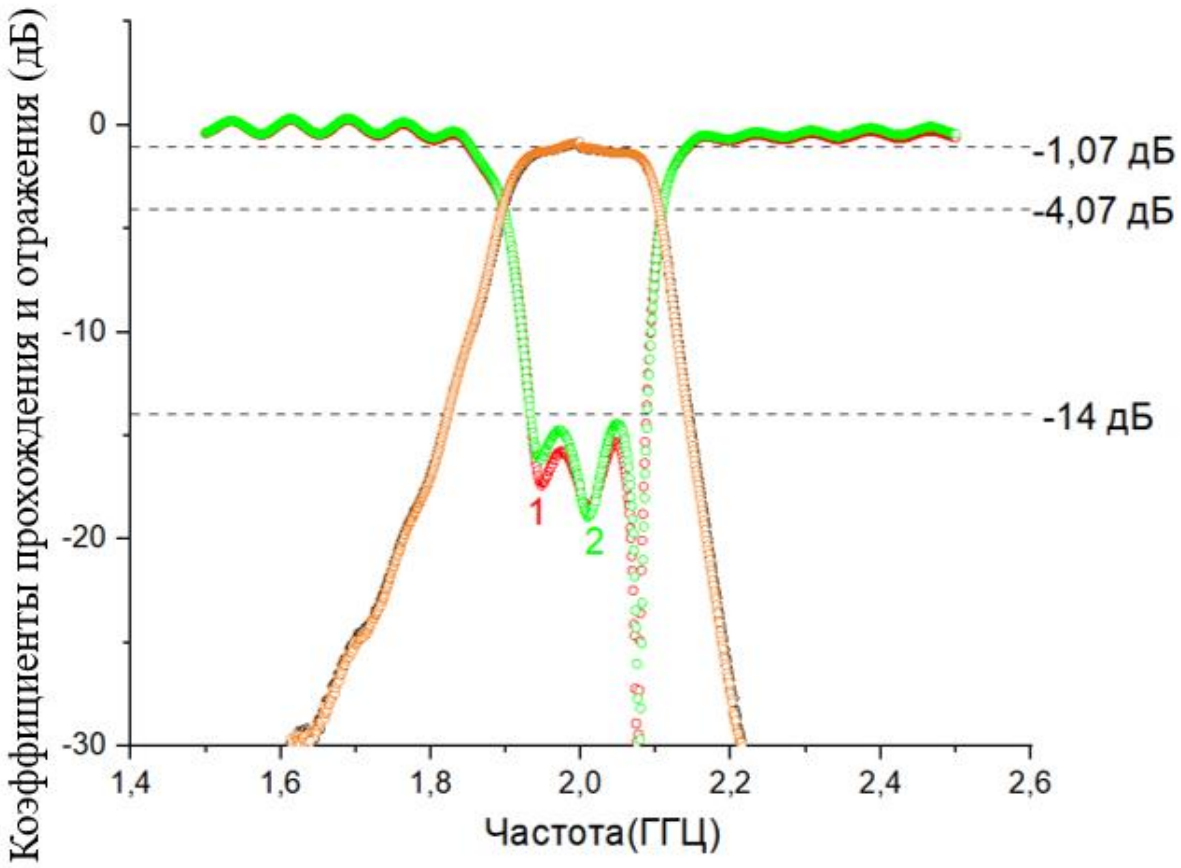

Рисунок 13 – Промежуточные АЧХ при настройке фильтра

В таблице 6 приведены основные параметры АЧХ фильтра.

Таблица 6 – Основные параметры АЧХ фильтра

F_0, ГГц	$(F_{hpass} - F_{lpass})$, МГц	L_0, дБ	$R_{min\ 1}$, дБ	$R_{min\ 2}$, дБ
2	219	-1,05	-14,4	-14,35

Все основные параметры АЧХ соответствуют ТЗ, кроме полосы пропускания.

Сравнение АЧХ фильтра расчетного и практического представлены на рисунке 14.

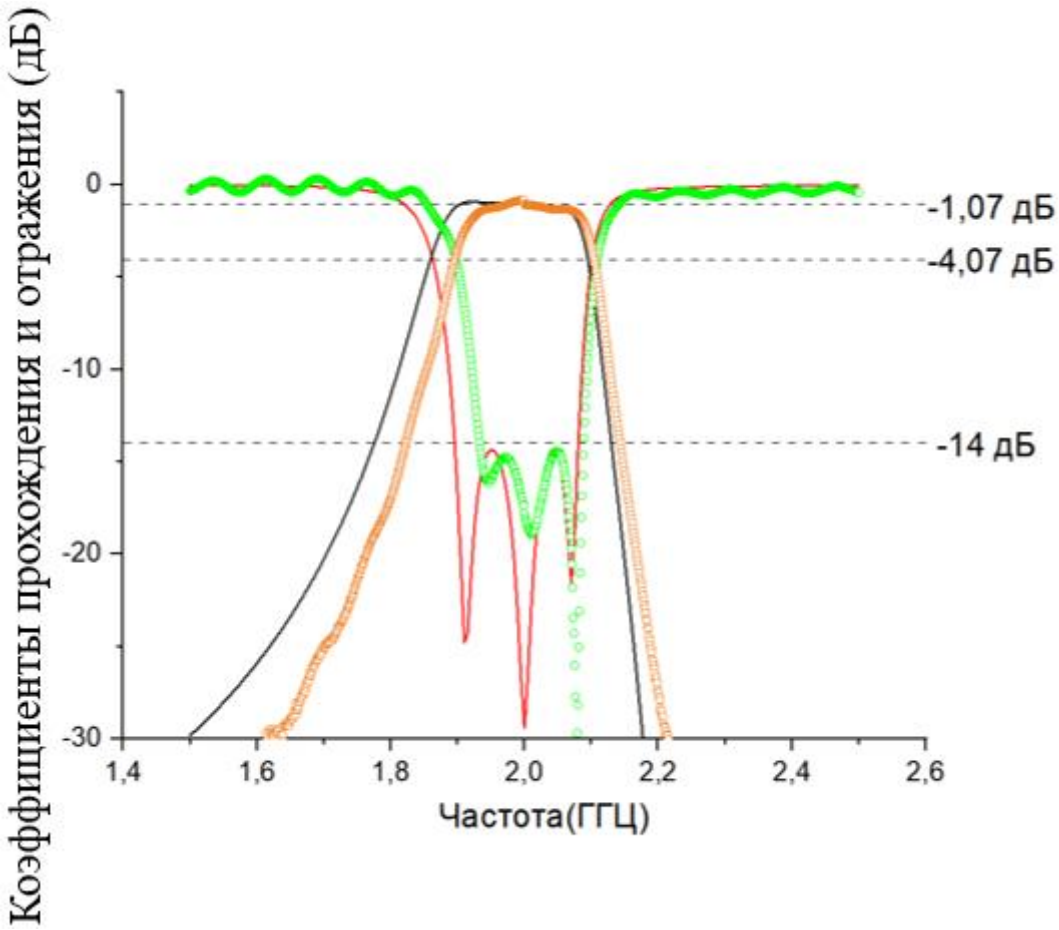

Рисунок 14 – Сравнение АЧХ фильтра расчетного и практического

В таблице 7 приведены основные параметры АЧХ фильтров расчетного и практического.

Таблица 7 –Основные параметры АЧХ фильтров расчетного и практического

Фильтр	F_0, ГГц	$(F_{hpass} - F_{lpass})$, МГц	L_0, дБ	$R_{min\ 1}$, дБ	$R_{min\ 2}$, дБ
Эксперимент	2	240	-1,05	-14,4	-14,35
Расчетный	2	219	-1,07	-14,6	-14,5

4 Сравнение фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах

В данном разделе проводится сравнение характеристик фильтров, изготовленных на полуволновых и четвертьволновых резонаторах.

4.1 Сравнение площадей топологии фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах

Топологии фильтров на четвертьволновых и полуволновых резонаторах приведены на рисунках 15 и 16.

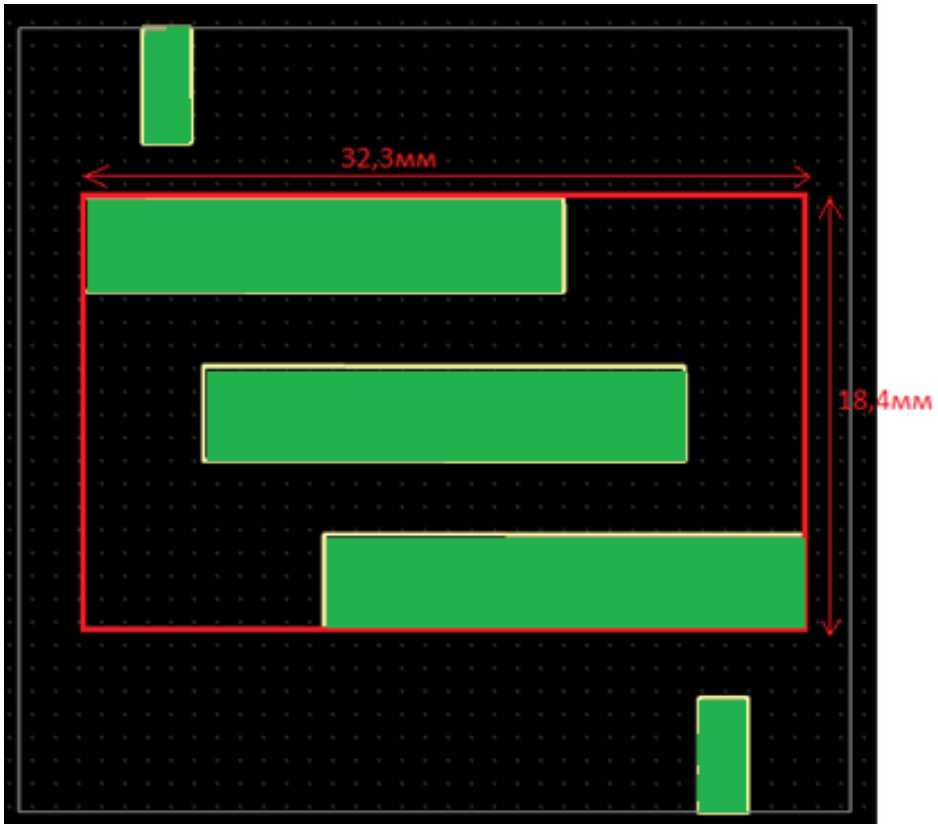

Рисунок 15 – Площадь топологии фильтра на полуволновых резонаторах

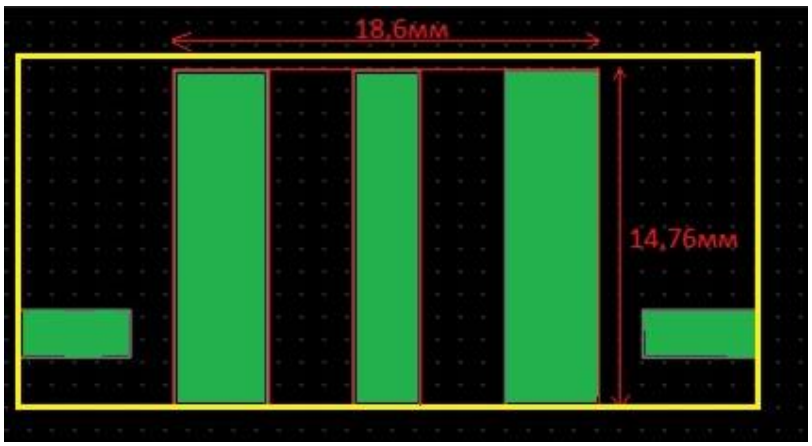

Рисунок 16 – Площадь топологии фильтра на четвертьволновых резонаторах

Эффективная диэлектрическая проницаемость для подложки с $\varepsilon = 8{,}6$:

$$\varepsilon_{eff1/4} = \frac{8{,}6+1}{2} + \frac{\frac{1}{\sqrt{7}}(8{,}6-1)}{2} \approx 6{,}23.$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость для подложки с $\varepsilon = 16{,}5$:

$$\varepsilon_{eff1/2} = \frac{16{,}5+1}{2} + \frac{\frac{1}{\sqrt{7}}(16{,}5-1)}{2} \approx 11{,}68.$$

Так как диэлектрическая проницаемость подложек отличается, необходимо внести в расчет поправку:

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_{ef1/2}}{\varepsilon_{ef1/4}}} = 1{,}37.$$

Площадь фильтра на четвертьволновых резонаторах с $\varepsilon = 16{,}5$:

$$S_{1/4} = \frac{274}{1{,}37} = 200 \text{ мм}^2.$$

Площадь фильтра на полуволновых резонаторах с $\varepsilon = 16{,}5$:

$$S_{1/2} = 575 \text{ мм}^2.$$

Соотношение площадей топологий фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах:

$$\frac{S1/2}{S1/4} = 2{,}9.$$

Можно сделать вывод, что фильтр на четвертьволновых резонаторах в 2,9 раза меньше фильтра на полуволновых резонаторах.

4.2 Сравнение АЧХ фильтров на полуволновых и четвертьволновых резонаторах

На рисунке 17 представлены АЧХ полуволнового и четвертьволнового микрополосковых фильтров.

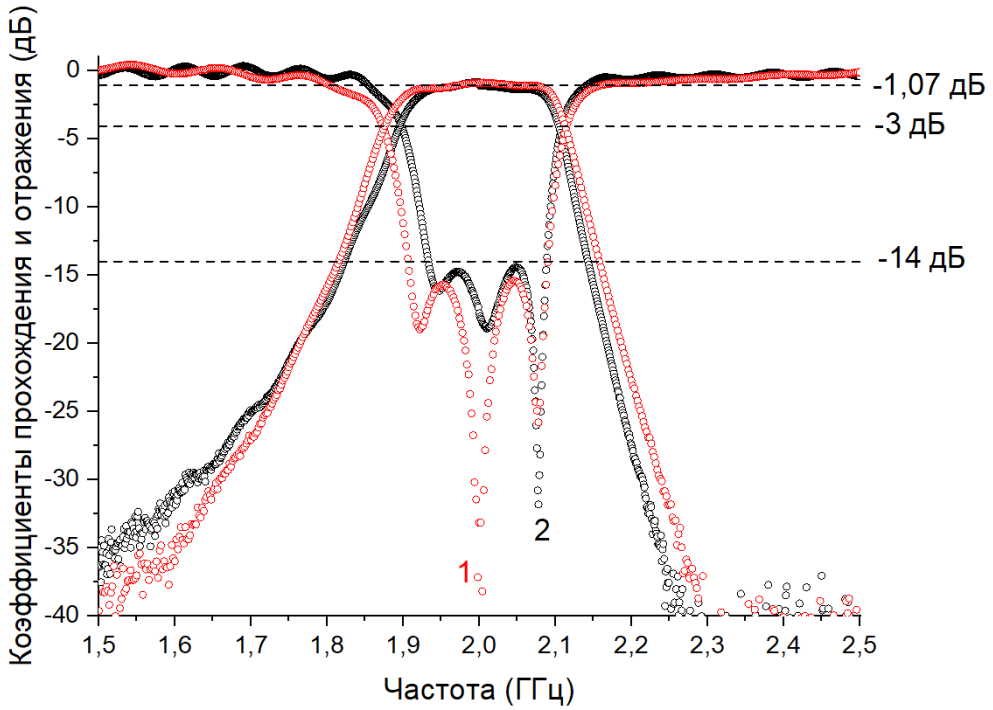

Рисунок 17 – Сравнение низкочастотного и высокочастотного склонов на полуволновых (1) и четвертьволновых (2) резонаторах

Была рассчитана крутизна низкочастотного и высокочастотного склона для полуволнового и четвертьволнового фильтров.

Для четвертьволнового фильтра:

$$q_{low} = \frac{0{,}103}{0{,}185-0{,}103} = 1{,}26.$$

$$q_{high} = \frac{0{,}105}{0{,}147-0{,}105} = 2{,}5.$$

Для полуволнового фильтра:

$$q_{low} = \frac{0{,}126}{0{,}147-0{,}126} = 1{,}91.$$

$$q_{high} = \frac{0{,}114}{0{,}162-0{,}114} = 2{,}375.$$

Чем больше коэффициент q, тем выше крутизна склона, тем лучше селективность фильтра. Из этого можно сделать вывод, что низкочастотный склон круче у полуволнового фильтра на МПР, а высокочастотный склон круче у четвертьволнового фильтра на МПР.

Выводы по сравнению АЧХ расчетного и экспериментального четвертьволновых фильтров на МПР:

а) центральная частота полосы пропускания на расчетном и экспериментальном фильтрах совпала;

б) при сравнении расчетной и экспериментальной АЧХ мы видим, что уровни минимумов обратных потерь экспериментального фильтра близки к расчетным значениям и соответствуют ТЗ;

в) полоса пропускания на экспериментальном фильтре получилась меньше, чем у расчетного фильтра на 20 МГц. Это произошло из-за подтравления МПР под лак в процессе изготовления фильтра.

5 Обеспечение безопасности труда и охраны здоровья

5.1 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.

5.2 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, состыковочных 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.

5.3 Требования охраны труда вовремя 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.

5.4 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.

5.5 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 [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

а) изучена литература по способам миниатюризации микрополосковых фильтров;

б) проведен расчёт фильтров по техническому заданию с использованием специальной программы AWR Microwave Office;

в) проведено изготовление макета фильтра;

г) проведена настройка макета фильтра на измерителе модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-04 фирмы «Микран»;

д) проведено сравнение характеристик рассчитанного и экспериментального фильтра на четвертьволновых резонаторах;

е) проведено сравнение площадей топологии и АЧХ фильтров на четвертьволновых и полуволновых резонаторах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1 Параметрический синтез лестничного микрополоскового фильтра по заданной амплитудно-частотной характеристике: метод. указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Радиотехника» для студентов направления 210400 «Телекоммуникации» и 210300 «Радиотехника» очной формы обучения / Б. А. Беляев, А. М. Сержантов, С. А. Ходенков; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2010. – 44 с.

2 Физические аспекты оптимальной настройки микрополосковых фильтров / сост. Б. А. Беляев, А. В. Казаков, М. И. Никитина, В. В. Тюрнев, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – Красноярск, 1996. – 41 с.

3 Измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-04. Руководство по эксплуатации. Ч.1. – Томск: Микран, 2012. – 27 с. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-04-UM-002_part1.pdf URL:(дата обращения 25.06.2021).

4 Измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-04. Руководство по эксплуатации. Ч.2. – Томск: Микран, 2011. – 96 с. [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-04-UM-001_part2.pdf URL:(дата обращения 25.06.2021).

5 Монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на многопроводниковых полосковых резонаторах / Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, Ан. А. Лексиков, и др., Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – Красноярск, Россия. Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия, 2021, № 13. – с. 16 – 20.

6 Миниатюризированные микрополосковые СВЧ фильтры /Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, и др., Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН – Красноярск, 1993. – 17 с.

7 Инструкции по охране труда. [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://goo.su/lmQE_URL:(дата обращения 28.01.2023).

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: Малыхин Максим
Проверяющий: Малыхин Максим

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - http://users.antiplagiat.ru

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 67
Начало загрузки: 22.01.2023 22:18:12
Длительность загрузки: 00:00:00
Имя исходного файла: Малыхин778.pdf
Название документа: Малыхин778
Размер текста: 36 кБ
Символов в тексте: 37253
Слов в тексте: 4253
Число предложений: 242

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 22.01.2023 19:18:14
Длительность проверки: 00:00:16
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет Free

СОВПАДЕНИЯ	САМОЦИТИРОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
13.37%	0%	0%	86.63%

Совпадения — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым была построена отчет, по отношению к общему объему документа.
Совпадения, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	3,03%	3,12%	Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах http://cslib.net	03 Июл 2016	Интернет Free	9	9
[02]	2,83%	2,99%	3163.Техническая электродинамика Основы электродинамики и распространение радиоволн Антенны и уст. http://decme.ru	07 Мая 2017	Интернет Free	14	15
[03]	2,14%	2,59%	Инструкция по охране труда http://prudu.m.ru	12 Апр 2017	Интернет Free	19	23

Еще источников: 5
Еще совпадений: 5,37%

Научный руководитель
к.ф.-м.н. Муравьев В.А.