

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа Информационных технологий и робототехники (ИШИТР)
 Направление подготовки – 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение Автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Применение метаматериалов в первичных измерительных преобразователях УДК 681.586:620.22-419.8:53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ91	Аксёнова Анна Магомедовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская Марина Витальевна	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федоренко Ольга Юрьевна	Д.М.Н., профессор		

По разделу на иностранном языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Маркова Наталия Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	Д.Т.Н., профессор		

**Планируемые результаты обучения по направлению
27.04.01 «Стандартизация и метрология»**

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, самостоятельно изучать научно-техническую документацию своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен определить математическую и техническую сущность задач и провести их качественно-количественный анализ
ОПК(У)-3	Способен на основании статистических методов участвовать в проведении корректирующих и превентивных мероприятий, направленных на улучшение качества, интерпретировать и представлять результаты
ОПК(У)-4	Способен анализировать полученные результаты измерений на основе их физической природы и принимать обоснованные решения в области профессиональной деятельности
ПК(У)-1	Способен к разработке и практической реализации систем стандартизации, сертификации и обеспечения единства измерений
ПК(У)-2	Готов обеспечить необходимую эффективность систем обеспечения достоверности измерений при неблагоприятных внешних воздействиях и планирование постоянного улучшения этих систем
ПК(У)-3	Способен анализировать состояние и динамику метрологического и нормативного обеспечения производства, стандартизации и

	сертификации на основе использования прогрессивных методов и средств
ПК(У)-4	Способен обеспечить выполнение заданий по разработке новых, пересмотру и гармонизации действующих технических регламентов, стандартов и других документов по техническому регулированию, стандартизации, сертификации, метрологическому обеспечению и управлению качеством
ПК(У)-5	Способен разрабатывать процедуры по реализации процесса подтверждения соответствия
ПК(У)-6	Готов обеспечить эффективность измерений при управлении технологическими процессами
ПК(У)-7	Готов обеспечить надежность и безопасность на всех этапах жизненного цикла продукции
ПК(У)-8	Способен к автоматизации процессов измерений, контроля и испытаний в производстве и при научных исследованиях
ПК(У)-29	Готов участвовать в научной и педагогической деятельности в области метрологии, технического регулирования и управления качеством

	с конструкциями на основе метаматериалов; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; Социальная ответственность; Заключение.
--	---

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация, выполненная в программной среде MS Power Point.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Верховская Марина Витальевна
«Социальная ответственность»	Федоренко Ольга Юрьевна
«Раздел на английском языке»	Маркова Наталия Александровна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Метаматериалы (Metamaterials)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ91	Аксёнова Анна Магомедовна		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа Информационных технологий и робототехники (ИШИТР)

Направление подготовки – 27.04.01 Стандартизация и метрология

Отделение школы (НОЦ) – Отделение Автоматизации и робототехники

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
02.03.2021	Обзор физических свойств метаматериалов	15
15.03.2021	Первичные измерительные преобразователи	15
10.04.2021	Проектирование полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров	25
30.04.2021	Сравнительный анализ фильтров с конструкциями на основе метаматериалов	10
08.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
17.05.2021	Социальная ответственность	10
20.05.2021	Раздел на иностранном языке	10
04.06.2021	Оформление пояснительной записки	5
Итого:		100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	д.т.н., профессор		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ91	Аксёновой Анне Магомедовне

Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология Метрологический анализ и экспертиза технических систем

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов	В исследовании задействованы 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. Бюджет проекта – не более 292 468 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	НР 34-70-32-83, РД 34.10.301, РД 34.10.102-91, ГОСТ Р 51387-99, МУ 34-00-094-85, ГОСТ Р 53905-2010
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления в социальные фонды – 30 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Описание потенциального потребителя, SWOT анализ
2. Планирование этапов и выполнения работ по НИР (определение состава работы, определение действующих лиц, установление длительности и трудоемкости работы)	Планирование научно-исследовательских работ, определение действующих лиц, длительности и трудоемкости работ
3. Расчет бюджета для научно-технического исследования	Определение материальных затрат НТИ, затрат на специальное оборудование, расчет основной заработной платы и накладных расходов
4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка целесообразности и эффективности научного исследования. Анализ и оценка научно-технического уровня исследования. Оценка рисков

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. SWOT-анализ 4. Иерархическая структура работ проекта 5. График проведения и бюджет НТИ 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская Марина Витальевна	К.Э.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ91	Аксёнова Анна Магомедовна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ91	Аксёновой Анне Магомедовне

Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология Метрологический анализ и экспертиза технических систем

Тема ВКР:

Применение метаматериалов в первичных измерительных преобразователях	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: левоориентированные среды. Рабочее место: учебная аудитория 208б, 10-ый корпус НИ ТПУ. Технические параметры аудитории: площадь – 40 м²; отопление – централизованное; вентиляция – приточно-вытяжная; освещение – люминесцентные лампы ЛБ; оборудование – персональные компьютеры.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение; – СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах; – СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; – СН 2.2.4/ 2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы; – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Электробезопасность; – ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность; – ГОСТ 17.4.3.04-85 ССОП Охрана природы. Почвы; – Трудовой кодекс Российской

	Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); – ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: – Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей среды; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Повышенный уровень шума; – Психофизиологические факторы (монотонность труда, нервно-психические перегрузки, перенапряжение зрительных анализаторов). Опасные факторы: – Поражение электрическим током; – Короткое замыкание; – Статическое электричество.
3. Экологическая безопасность:	Литосфера: – Загрязнение при утилизации: компьютера и периферийных устройств (принтеры, МФУ, веб-камеры, наушники, колонки, телефоны); люминесцентных ламп; макулатуры.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: – Пожар в здании, грозы, ураганы, оползни. Наиболее типичная ЧС – Пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федоренко Ольга Юрьевна	д.м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ91	Аксёнова Анна Магомедовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 117 страниц, 45 рисунков, 22 таблицы, 48 использованных источников.

Ключевые слова: метаматериалы, первичный измерительный преобразователь, полосно-заграждающий фильтр, полосно-пропускающий фильтр, коэффициент отражения, сверхвысокие частоты.

Объектом исследования является применение метаматериалов в первичных измерительных преобразователях.

Целью данной работы является разработка полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтра первичного измерительного преобразователя сверхвысокой частоты с проведением сравнительных характеристик конструкций частотно-селективных СВЧ-устройств, выполненных на основе метаматериала.

Для достижения поставленной цели в ВКР поставлены следующие задачи:

1. провести обзор научных статей по тематике создания метаматериалов, рассмотрение классификации и особенностей электродинамических свойств левоориентированных сред;
2. рассмотреть использование первичных измерительных преобразователей в метрологии, а также рассмотреть применение полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров в технике сверхвысоких частот;
3. спроектировать компьютерную модель полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтра сверхвысокой частоты в программном комплексе AWR Microwave Office v.9.0. Рассмотреть аналоги конструкций на основе метаматериалов;
4. провести сравнительный анализ спроектированных моделей фильтров с грибовидной полосно-заграждающей структурой и полосно-пропускающей структурой Н-волновода на основе метаматериалов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ПИП – первичный измерительный преобразователь;

ПЗФ – полосно-заграждающий фильтр;

ППФ – полосно-пропускающий фильтр;

ФНЧ – фильтр низких частот;

ФВЧ – фильтр высоких частот;

СВЧ – сверхвысокочастотный;

ПК – персональный компьютер;

SWOT – анализ – S (сильные стороны), W (слабые стороны),

O (возможности), T (угрозы);

РФ – Российская Федерация;

НДС – налог на добавленную стоимость;

НИР – научно-исследовательская работа;

ЧС – чрезвычайный случай.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	15
1 ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ.....	18
1.1 Метаматериалы.....	18
1.2 Основные электродинамические соотношения для левых сред	24
2 ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	30
2.1 Классификация ПИП.....	30
2.2 Полосно-заграждающие и полосно-пропускающие фильтры сверхвысоких частот	32
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕГО И ПОЛОСНО- ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРОВ.....	38
3.1 Проектирование полосно-заграждающего фильтра в программном комплексе Microwave Office	38
3.2 Метаматериал на основе грибовидной полосно-заграждающей структуры.....	45
3.3 Проектирование полосно-пропускающего фильтра в программном комплексе Microwave Office	49
3.4 Полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н- волновода на основе метаматериала	56
4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЛЬТРОВ С КОНСТРУКЦИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ	60
4.1 Сравнительный анализ полосно-заграждающего фильтра с конструкцией на основе метаматериала	60
4.2 Сравнительный анализ полосно-пропускающего фильтра с конструкцией на основе метаматериала	62
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	65
5.1 Цели проекта.....	65
5.2 Потенциальные потребители результатов исследования.....	66
5.3 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	66
5.4 SWOT – анализ	69
5.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	70

5.6 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	71
5.7 Инициация проекта	72
5.8 Планирование управления научно-техническим проектом	74
5.8.1 Иерархическая структура работа проекта	74
5.8.2 Контрольные события проекта	75
4.8.3 План проекта	76
5.9 Бюджет научного исследования	79
5.9.1 Определение стоимости материальных затрат	79
5.9.2 Амортизация	79
5.9.3 Полная заработная плата исполнителей.....	80
5.9.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	81
5.9.5 Накладные расходы	82
5.9.6 Формирование сметы проекта	82
5.10 Оценка сравнительной эффективности исследования	83
5.11 Заключение по разделу «Финансовый менеджмент»	84
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	86
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	86
6.2 Производственная безопасность.....	89
6.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов	90
6.3 Экологическая безопасность.....	97
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	99
6.5 Заключение по разделу «Социальная ответственность».....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Metamaterials	109

ВВЕДЕНИЕ

В процессе научной и производственной деятельности возникает множество практических и теоретических задач, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о различных свойствах исследуемого объекта. Основным способом получения этой информации является измерение данного объекта с необходимой точностью, с целью отражения его физических свойств.

Во всем мире ежедневно выполняется более миллиона измерений, проводимых с помощью специальных измерительных приборов. Основными элементами большинства применяемых средств измерений в метрологии являются первичные измерительные преобразователи, назначение которых – преобразование измеряемой физической входной величины в сигнал измерительной информации выходной величины.

Прибор, состоящий из первичных измерительных преобразователей, называется датчиком. Датчик измеряет различные физические величины: температура, давление, влажность, поток света и так далее. В состав датчика, помимо чувствительного элемента, воспринимающего измеряемую величину и преобразующего её в электрический сигнал, могут входить преобразователи и другие функциональные узлы. Количество необходимых промежуточных этапов преобразований определяется интерфейсными возможностями и точностью датчика.

Точность является одной из важнейших характеристик датчика, которая оценивается через отклонение результата измерения от истинного значения измеряемого параметра. Для более точного измерения и преобразования физической величины в составе современных первичных измерительных преобразователей используются микроэлектронные устройства. Данные устройства в своем взаимодействии с электромагнитным полем вещества характеризуются рядом интегральных характеристик, такими как: проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость. Однако с

развитием технического прогресса ряд микроэлектронных устройств достигли своих предельных возможностей.

В стремлении к созданию более точных датчиков метрология как наука находится в постоянном поиске новых принципов по усовершенствованию средств измерений. Таким образом, возникает вопрос по созданию новых технологий в области измерительных устройств. Одним из решений данной проблемы стала революционная технология по созданию специальных материалов, которые получают с помощью искусственной модификации внедряемых в них элементов, названных метаматериалами.

Благодаря искусственному преобразованию структуры модифицированный объект приобретает совершенно новые свойства, которых нет у материалов природного происхождения, позволяющий модифицировать магнитную, диэлектрическую проницаемость, а также иные физические показатели выбранного объекта. В результате преобразованные материалы приобретают уникальные оптические, радиофизические, электрические и иные свойства, которые открывают широкие перспективы для развития научного прогресса в области метрологии.

Электрические устройства измерения в метрологии работают в широком диапазоне длины электромагнитной волны. Одним из направлений устройств, применяемых в метрологических измерениях, являются сверхвысокочастотные радиоустройства, служащие для скоростной передачи информации, применяемые в системах радиолокации и радионавигации, системах для измерения таких параметров как, перемещение, скорость, вибрация и так далее. Это обуславливает необходимость разработки средств измерений сверхвысокочастотного диапазона длин волн, а также решения вопросов их метрологического обеспечения. С точки зрения метрологии решение этих задач в коротковолновой части СВЧ диапазона (миллиметровом диапазоне длин волн) связано с решением уникальных проблем, поскольку размеры компонентов на этих частотах сравнимы с длиной волны.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтра первичного измерительного преобразователя сверхвысокой частоты с проведением сравнительных характеристик конструкций частотно-селективных СВЧ-устройств, выполненных на основе метаматериала.

Для достижения поставленной цели в выпускной квалификационной работе поставлены следующие задачи:

1. провести обзор научных статей по тематике создания метаматериалов, рассмотрение классификации и особенностей электродинамических свойств левоориентированных сред;

2. рассмотреть использование первичных измерительных преобразователей в метрологии, а также рассмотреть применение полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров в технике сверхвысоких частот;

3. спроектировать компьютерную модель полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтра сверхвысокой частоты в программном комплексе AWR Microwave Office v.9.0. Рассмотреть аналоги конструкций на основе метаматериалов;

4. провести сравнительный анализ спроектированных моделей фильтров с грибовидной полосно-заграждающей структурой и полосно-пропускающей структурой Н-волновода на основе метаматериалов.

1 ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

1.1 Метаматериалы

Одним из приоритетных направлений в науке сегодняшнего дня является создание искусственных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Данные вещества получили название метаматериалы [1].

Метаматериал – это искусственно сформированная и особым образом структурированная среда, обладающая электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Измененная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала. Разработчик метаматериалов имеет возможность выбора различных свободных параметров (размеры структур, форма, постоянный и переменный период решетки элементов, образующих структуру).

Одно из возможных свойств метаматериалов – отрицательный коэффициент преломления n , который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемостей материала.

Оптические свойства вещества характеризуются коэффициентом преломления n , который связан с ε , μ простым соотношением [1]:

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \quad (0.1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость.

Для вакуума $\varepsilon = \mu = 1$, а для остальных веществ, встречающихся в природе, $\varepsilon, \mu > 0$. Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+» и поэтому показатель преломления положителен. Если не учитывать потери в среде и считать, что ε и μ – действительные величины, то из соотношения (1.1) видно, что одновременная смена знаков ε и μ не меняет физический смысл выражения.

Учитывая этот факт, можно высказать следующие предположения:

1. свойства веществ действительно не зависят от одновременной смены знаков ϵ и μ ;
2. одновременная смена знаков противоречит основным законам природы и таких веществ в природе не должно быть;
3. вещества с $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$ имеют право на существование и они должны обладать какими-то особыми свойствами.

Такие вещества были названы советским ученым В.Г. Веселаго в 1967 году, как «левыми». В своих работах ученый В.Г. Веселаго описал многие необычные свойства «левых» веществ, в частности, показал, что такие вещества должны обладать отрицательным показателем преломления, то есть для «левых» сред нужно брать знак «-».

Рассмотрим более детально типы метаматериалов и их структуру.

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных значений их диэлектрической и магнитной проницаемостей (рисунок 1).

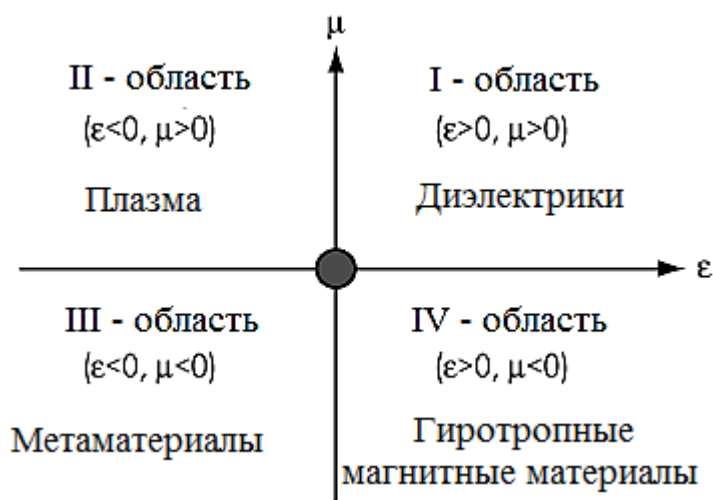


Рисунок 1 – Диаграмма ϵ - μ [2]

Как описывалось ранее, у почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемости $\epsilon, \mu > 0$. Также, у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического

использования диапазонах частот в области микроэлектроники и метрологии эти параметры, как правило $\varepsilon, \mu \geq 1$. Рассмотрим каждую из областей диаграммы ε - μ более детально.

I – область

В зарубежной литературе данные материалы обычно называют «двойные положительные», подчеркивая тем самым положительность значений как ε , так и μ . Среды области I считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы. Область I – большинство изотропных диэлектриков.

II – область

Наиболее известным примером естественной среды II области, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле [2]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (0.2)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой.

Плазменная частота зависит от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна, и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\varepsilon > 0$, и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\varepsilon(\omega) > 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением [2].

На рисунке 2 представлен пример метаматериала II области, представляющий систему из тонких расположенных параллельно металлических проводников.

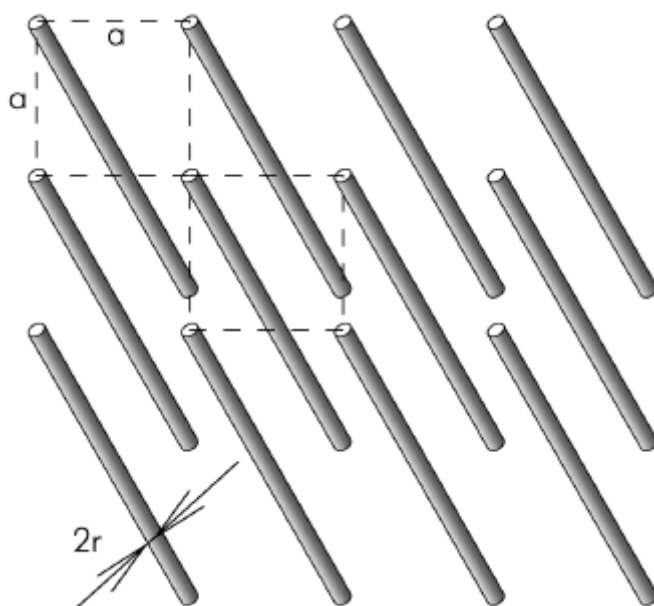


Рисунок 2 – Метаматериал области II в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик [2]

IV – область

Средами с положительной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостями являются, в определенных частотных режимах, некоторые гиротропные вещества. Простейшим элементом, позволяющим создать искусственную среду IV типа является кольцевой разомкнутый резонатор, представленный на рисунке 3.



Рисунок 3 – Кольцевой разомкнутый резонатор [2]

В этой структуре емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые, в зависимости от резонансных свойств структуры, порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям μ . Магнитная проницаемость метаматериала, созданного с применением таких структур, описывается формулой [4]:

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F \cdot \omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i \cdot \omega \cdot \zeta} \quad (0.3)$$

где ω_{0m} – резонансная частота кольцевого резонатора; ζ – параметр затухания.

Как видно из формулы (1.3), на частотах выше резонансной эффективная магнитная проницаемость такого метаматериала отрицательна [4].

III – область

Вещества, у которых $\varepsilon, \mu < 0$ относят к области III диаграммы изображенной на рисунке 1. К таким веществам относятся, например, чистые ферромагнитные металлы и полупроводники. В них при распространении определенного типа волн вдоль направления приложенного внешнего магнитного поля эффективные электрическая и магнитная проницаемости могут одновременно принимать отрицательные значения [3].

Применение этих структур для получения метаматериалов, обладающих отрицательными эффективными значениями диэлектрической и магнитной составляющей, впервые предложил Джон Пендри в 1999 году [2].

Его подход заключался в том, что если композитный материал состоит из дискретных рассеивающих элементов, размер которых меньше длины волны излучения, то данный композит с точки зрения

электродинамики можно рассматривать как непрерывный в ограниченной полосе частот. Другими словами, физическая среда будет непрерывной в электромагнитном смысле, если ее свойства могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе, намного большем, чем размеры и интервал образующих материал компонентов.

Таким образом, был впервые получен материал, обладающий одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями (материал области III). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако в 2006 году было установлено, что кристаллы $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ обладают такими же свойствами в диапазоне 150 ГГц.

Материалы III типа обладают рядом интересных свойств, наиболее примечательным из которых является отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн n . Результаты прямого измерения угла преломления для призмы, изготовленной на основе метаматериала, приведенного на рисунке 4, убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе вакуума и такой композитной среды имеет отрицательное значение n .



Рисунок 4 – Комбинация структур с отрицательной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостями [2]

Отрицательная величина коэффициента преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из материалов III типа. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковогнутая линза, изготовленная из материала III, действует как фокусирующая. Кроме того, обычная плоскопараллельная пластина с $n = -1$ может выступать в роли собирающей линзы [2].

Поскольку метаматериалы являются структурами с уникальными электромагнитными свойствами, они находят широкое применение при разработке и производстве различных сверхвысокочастотных устройств. На их основе строят резонаторы, фазовращатели, различного вида фильтры.

Компоненты электромагнитных цепей, обладающие свойствами метаматериалов, применяются также в технике антенн в диапазоне частот от 100 МГц до 100 ГГц.

Основными направлениями использования метаматериалов при этом являются:

- излучатели, расположенные над высокоимпедансной поверхностью;
- антенны с излучающей поверхностной волной;
- уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах;
- увеличение коэффициента усиления рупорной антенны.

1.2 Основные электродинамические соотношения для левых сред

Для вывода основных соотношений, описывающих распространения волн в среде, необходимо использовать уравнения Максвелла и соотношения, характеризующие свойства среды [1]:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \tag{0.4}$$

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E \quad (0.5)$$

где B , H – вектора индукции и напряженности магнитного поля; D , E – вектора индукции и напряженности электрического поля; ε_0 , μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

Представим электрическую и магнитные проницаемости среды в виде [3]:

$$\varepsilon = p \cdot |\varepsilon|, \quad \mu = p \cdot |\mu| \quad (0.6)$$

Предположим, что в среде в направлении оси z распространяется плоская монохроматическая волна, у которой все величины изменяются по закону $\exp(i \cdot (\omega \cdot t - k \cdot z))$. Используя уравнения Максвелла и приведенные выше соотношения, для такой волны можно получить следующие выражения, описывающие связь между E , H и волновым вектором k [1]:

$$[k \cdot E] = \omega \cdot \mu_0 \cdot p \cdot |\mu| \cdot H, \quad [k \cdot H] = -\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot p \cdot |\varepsilon| \cdot E \quad (0.7)$$

На рисунке 5 представлено расположение векторов k , E и H .



Рисунок 5 – Направление векторов k , E , H и S [1]

где а – для «правой» среды; б – для «левой» среды.

Поток энергии, переносимый электромагнитной волной, определяется вектором Умова–Пойтинга S , который записывается как [1]:

$$S = [E \cdot H] = \omega \cdot V_{gp} \quad (0.8)$$

где ω – плотность энергии электромагнитной волны; $V_{гр}$ – групповая скорость, то есть скорость переноса энергии.

Таким образом, волна, распространяясь в среде, имеет две скорости – фазовую V_{ϕ} и групповую $V_{гр}$. Фазовая скорость – это скорость движения фазы волны, например, максимума или минимума колебательного процесса, а групповая скорость – это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковы и направлены в одну сторону.

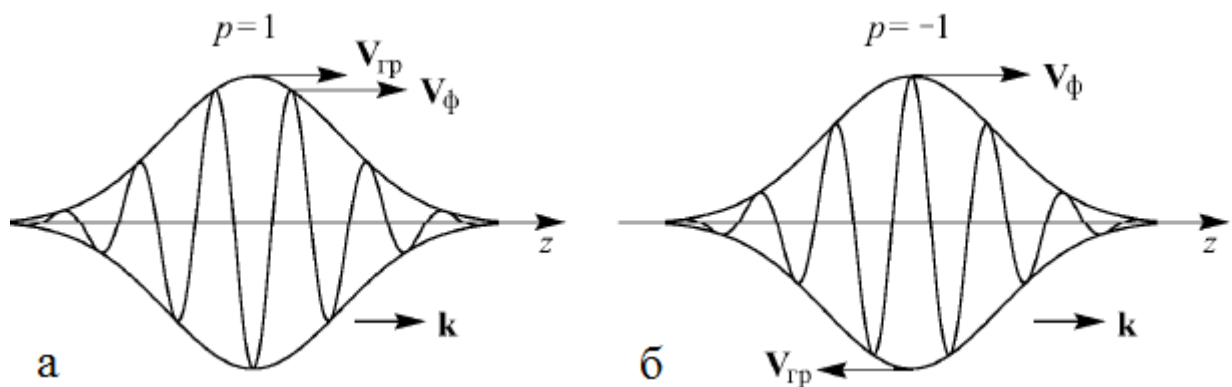


Рисунок 6 – Импульс электромагнитной волны, распространяющийся в направлении z [1]

где а – в «правой» среде; б – в «левой» среде.

Из соотношения (1.8) видно, что вектор S , а следовательно и $V_{гр}$, образуют с векторами E и H всегда правую тройку векторов. Таким образом, для «правых» сред фазовая и групповая скорости всегда направлены в одну сторону (рисунок 6,а), а для «левых» сред вектора $V_{гр}$ и V_{ϕ} – в разные стороны (рисунок 6,б), то есть это среды с отрицательной групповой скоростью.

Рассмотрим следующие эффекты, возникающие в «правых» и «левых» средах:

1. обращенный эффект Доплера;
2. световое притяжение;

3. преломление луча на границе с левой средой.

Обращенный эффект Доплера

Изменение частоты колебаний вследствие движения источника или приемника называется эффектом Доплера. Пусть приемник излучения В движется со скоростью V относительно излучателя А, который излучает частоту ω_0 , как показано на рисунке 7. В этом случае для частоты, воспринимаемой приемником вследствие доплеровского сдвига, можно записать выражение [1]:

$$\omega = \omega_0 \left(1 + p \frac{V}{V_{gp}} \right) \quad (0.9)$$

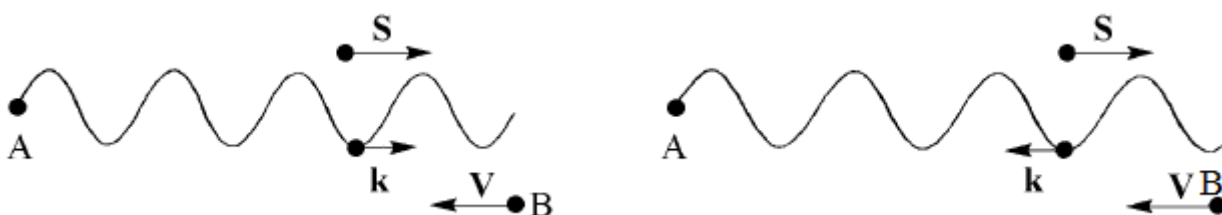


Рисунок 7 – Эффект Доплера [3]

где а – для «правой» среды ($p = +1$); б – для «левой» среды ($p = -1$).

В «левой» среде ($p = -1$) приемник будет догонять точки волны, соответствующие какой-либо определенной фазе (рисунок 7,б). При этом в формуле (1.9) скорости V и V_{gp} направлены в разные стороны. Поэтому в «правой» среде удаляющийся от нас объект кажется более красным из-за эффекта Доплера, а в «левой» среде будет казаться более синим.

Световое притяжение

Монохроматическую волну в «левой» среде можно рассматривать как поток фотонов, каждый из которых обладает импульсом $p = \hbar \cdot k$.

где k – волновой вектор, причем вектор k направлен к источнику излучения A , а не от него, как это имеет место в «правой» среде (рисунок 8).

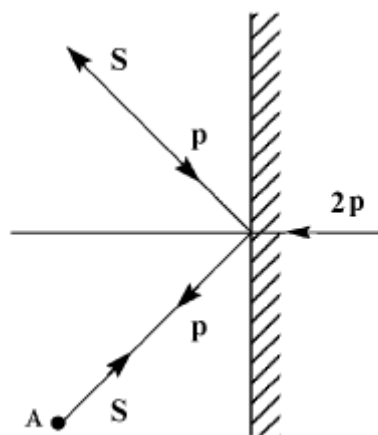


Рисунок 8 – Отражение луча, распространяющегося в «левой» среде [1]

Поэтому луч света, распространяющийся в «левой» среде, при падении на идеально отражающую поверхность будет передавать ей импульс $p = 2 \cdot N \cdot \hbar \cdot k$ (N – число падающих фотонов), направленный к источнику, как показано на рисунке 8. Поэтому световое давление, характерное для обычных сред, в «левой» среде заменяется световым притяжением.

Преломление луча на границе с левой средой

Использование «левых» сред позволяет создать необычные преломляющие системы. Примером является простая пластина толщиной d из «левого» вещества с $n < 0$, находящаяся в воздухе (рисунок 9).

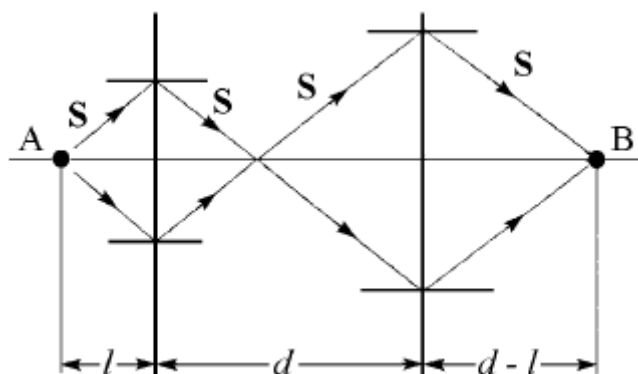


Рисунок 9 – Прохождение луча света через пластину из левого вещества [1]

где А – источник излучения; В – приемник излучения.

Такая пластина может фокусировать в точку В излучение точечного источника А, находящегося на расстоянии $l < d$ от пластины. Главное свойство – у нее отсутствует фокальная плоскость. Это означает, что линза создает объемное изображение предмета, что делает ее похожей на зеркало. Но, в отличие от зеркала, создаваемое изображение действительное, что открывает новые возможности для цветной фотографии. Плоско-параллельная пластина с $\varepsilon = \mu = -1$ является «идеальной» линзой, поскольку она имеет нулевой коэффициент отражения и создается идеальное изображение, так как набег фазы по любым траекториям между объектом и изображением равен нулю.

2 ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1 Классификация ПИП

Все измерения начинаются с восприятия измеряемых величин и формирования измерительного сигнала, который затем подвергается необходимым преобразованиям. Подавляющее число физических неэлектрических величин в процессе измерения преобразуется в электрические величины. Для осуществления подобных преобразований находят широкое применение различные первичные измерительные преобразователи [7].

Первичный измерительный преобразователь – это техническое устройство, которое непосредственно взаимодействует с материальным объектом измерения или контроля и предназначено для однозначного функционального преобразования одной физической величины – входной – в другую физическую величину – выходную, которая является удобной для дальнейшего использования [6].

Для дальнейшего изучения первичных измерительных преобразователей воспользуемся его классификацией. Существует значительное количество классификаций преобразователей и датчиков по различным классификационным признакам. Например, в работе [8] приведена классификация датчиков по 24 классификационным признакам.

В данной выпускной квалификационной работе вопрос классификации ПИП не является стольким важным, соответственно рассмотрим основные признаки. По видам входных и выходных величин измерительные преобразователи можно разделить на 4 больших класса (рисунок 10):

– преобразователи электрических величин в электрические, например, непрерывных во времени (аналоговых) в прерывистые (дискретные, цифровые);

- преобразователи неэлектрических величин в неэлектрические, например, давление в перемещение жесткого центра мембраны;
 - преобразователи электрических величин в неэлектрические, например, тока в отклонение стрелки прибора;
 - преобразователи неэлектрических величин в электрические.
- Примером могут служить преобразователи вибраций, температуры, пьезоэлектрические датчики и так далее.

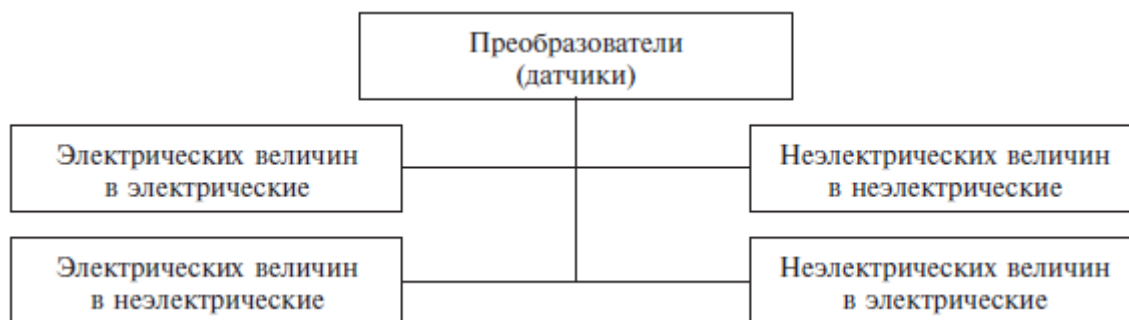


Рисунок 10 – Классификация преобразователей по виду входных и выходных величин [6]

Важнейшим классификационным признаком для датчиков является принцип преобразования физических величин. На рисунке 11 приведена классификация ПИП по принципу действия.

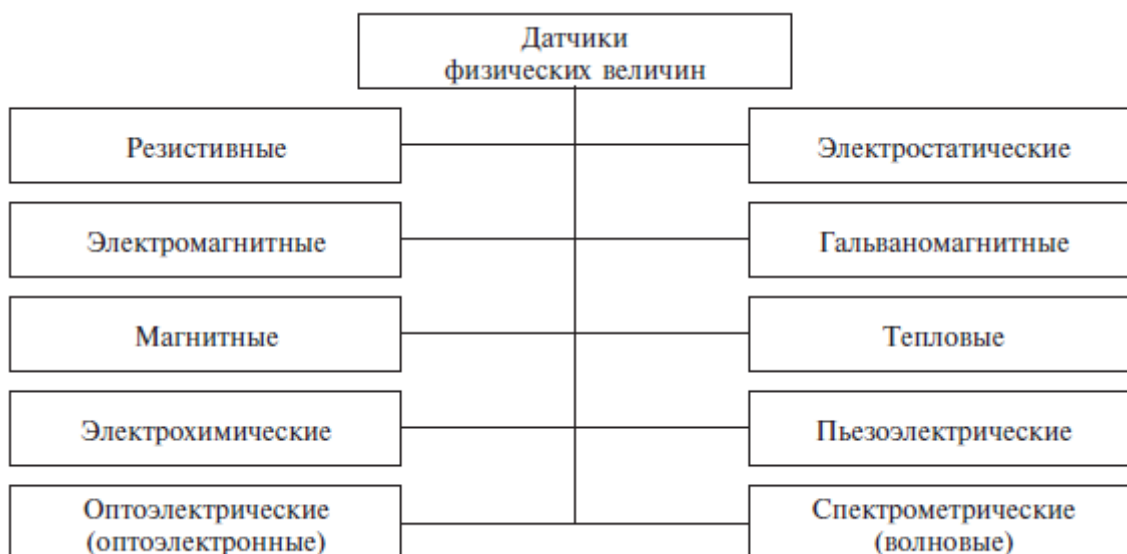


Рисунок 11 – Классификация датчиков по принципу действия [6]

Далее необходимо рассмотреть классификацию датчиков по виду измеряемых электрических величин, так как данный класс датчиков рассматривается в данной научно-исследовательской работе.



Рисунок 12 – Классификация датчиков по виду измеряемых электрических величин [6]

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются преобразователи неэлектрических величин в электрические, которые смогут обеспечить высокую точность при измерениях в миллиметровом диапазоне длин.

2.2 Полосно-заграждающие и полосно-пропускающие фильтры сверхвысоких частот

Фильтры являются важнейшим пассивным компонентом любой базовой станции и ретранслятора высокочастотной системы. Важность этого компонента обусловлена необходимостью обеспечить избирательность системы по частоте, чтобы не создавать помех другим системам, например, телевизионным или специальных служб, использующих другой частотный

диапазон, и не принимать их сигналы, создающие помехи собственной системе, в которой они установлены. Фильтры различаются по типам в зависимости от их функционального назначения.

В этой главе рассматриваются полосно-заграждающие и полосно-пропускающие фильтры, входящие в состав электронных схем конкретных первичных измерительных преобразователей.

Выходной сигнал датчиков обычно бывает слабым, сопровождается шумами и помехами, а также практически всегда пребывает в формате, который не воспринимается непосредственно процессорами или стандартными измерительными приборами. Кроме того, для нормального функционирования параметрические датчики требуют источников питания или возбуждения.

Электронные устройства, преобразующие выходной сигнал датчиков к виду, удобному для последующей обработки, называют измерительными или согласующими электронными схемами датчиков. Задачи таких устройств состоят в следующем:

- согласование параметров выходного сигнала датчика с входными параметрами последующих измерительных или вычислительных устройств;
- согласование выходного сопротивления датчика с входным сопротивлением этих устройств.

Согласующие устройства в большинстве случаев представляют собой вторичные измерительные преобразователи, технические и метрологические характеристики которых влияют на соответствующие характеристики датчиков.

Общей тенденцией (которая, однако, не всегда может быть реализована) является стремление расположить электронные схемы в корпусе датчика, чтобы избежать влияния паразитных параметров (емкости и сопротивления соединительных проводов и кабелей), помех и наводок, возникающих в различных элементах схемы.

Фильтры применяются для частотной селекции сигналов. Особенностью фильтров СВЧ является их реализация в виде распределенных структур (отрезков линий передачи). Этим они отличаются от обычных электрических фильтров, в которых используются сосредоточенные LC-элементы. Основная характеристика фильтра СВЧ – это частотная зависимость вносимого ослабления (затухания) в СВЧ тракте.

Область частот с малым ослаблением принято называть полосой пропускания, область с большим ослаблением – полосой заграждения. По взаимному расположению этих полос принято различать следующие типы фильтров (рисунок 13):

1. Фильтры нижних частот «ФНЧ»

Фильтр нижних частот, как и следует из названия, пропускает нижние частоты входного сигнала, при этом подавляя частоты выше частоты среза. Эти фильтры используются для подавления пульсаций напряжения на выходе выпрямителей переменного тока и в системах передачи данных для подавления высокочастотных помех, а именно паразитных сигналов и гармоник высшего порядка.

2. Фильтры верхних частот «ФВЧ»

Фильтр верхних частот, как следует из названия, пропускает только верхние частоты и срезает нижние. В настоящее время этот тип пассивного компонента используется реже остальных поскольку чем выше частота, тем больше потери мощности в фильтрах.

3. Полосно-пропускающие фильтры «ППФ»

Полосно-пропускающий фильтр используется наиболее часто и предназначен для пропускания только определенной полосы частот, отсекая все остальные составляющие ниже и выше этой полосы. Он является обязательным компонентом для всех систем передачи данных.

4. Полосно-заграждающие фильтры «ПЗФ»

Заграждающий фильтр не пропускает колебания некоторой определённой полосы частот и пропускает колебания с частотами,

выходящими за пределы этой полосы. Заграждающий фильтр предназначен, главным образом, для подавления внутриполосных помех, вызванными интерференцией соседних частот.

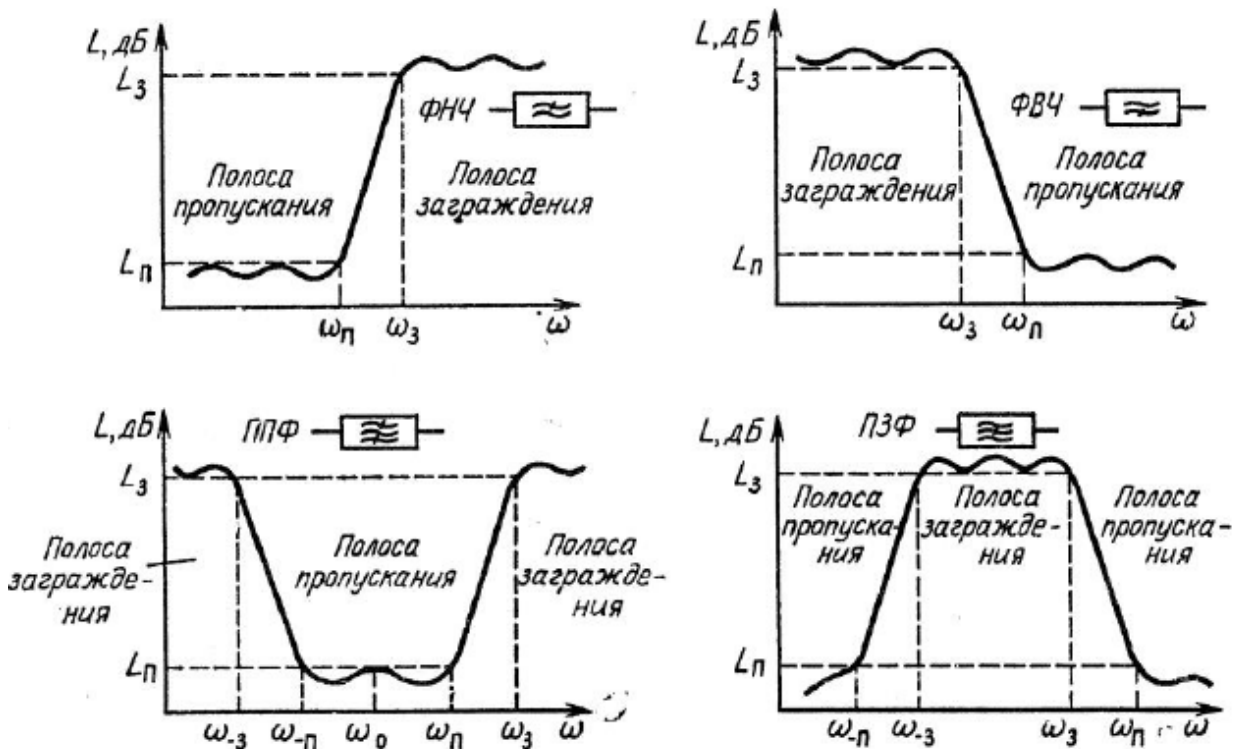


Рисунок 13 – Типы СВЧ фильтров [9]

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

Важными параметрами реальных фильтров являются допустимое ослабление в полосе пропускания и требуемое ослабление в полосе заграждения, уровень неравномерности (пульсации) коэффициента передачи (ослабления) в полосе пропускания и (или) в полосе заграждения.

Фильтры СВЧ обычно строят как каскадное соединение простых элементов – резонаторов, шлейфов, отрезков линий передачи и пр. Частотные характеристики этих элементов достаточно сложны и затрудняют синтез

фильтра по заданным параметрам. Наиболее распространенные виды характеристик – это максимально плоская АЧХ (Баттерворта) и равномерно-колебательная АЧХ (Чебышева) (рисунок 14).

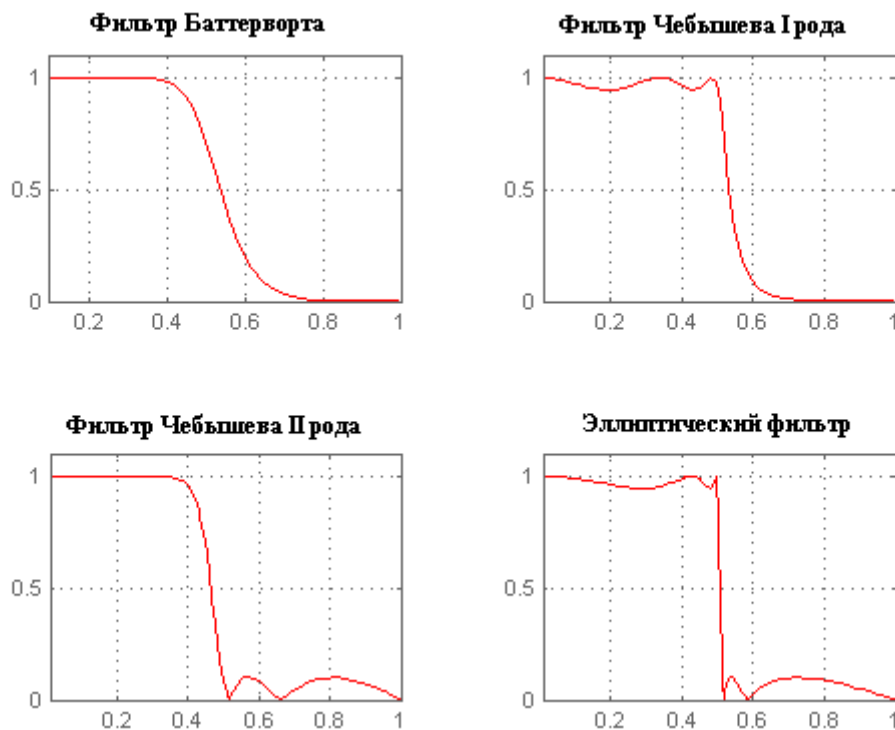


Рисунок 14 – Основные виды АЧХ фильтров [9]

На рисунке 14 представлены АЧХ фильтров, которые существенно различаются по величине потерь внутри полосы, остаточным пульсациям и крутизне спада. Как видно из графика АЧХ фильтра Баттерворта на частотах полоса пропускания гладкая, а внутренние потери не велики. Это означает, что при достаточном выделении рабочей частоты и небольших внутренних потерях, соседние частоты не подавляются полностью. В фильтре Чебышева линия спада более крутая, что означает более значительное подавление соседних частот и выделение рабочей, чем в фильтре Баттерворта. При этом остаточные пульсации, а значит и потери в фильтре Чебышева больше. Эти различия и являются основными условиями при выборе того или другого фильтра.

Таким образом, основной неизбежный недостаток фильтра Чебышева, при всех остальных его достоинствах – это остаточные пульсации, которые, например, для повторителя рассчитываются как сумма пульсаций на каждом выходе фильтра или нескольких фильтров. Наряду с вносимыми потерями, пульсации являются вредоносным фактором для полезного сигнала, поэтому проектировщики стремятся уменьшить их величину различными способами. В настоящее время стандартная величина остаточных пульсаций составляет 50-60% от вносимых потерь.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕГО И ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРОВ

1.1 Проектирование полосно-заграждающего фильтра в программном комплексе Microwave Office

СВЧ-устройства широко применяются в технике военного и гражданского назначения. Так, в системах радиолокации и радионавигации используются генераторные, усилительные, полосовые и преобразующие СВЧ-устройства. Кроме того, СВЧ-устройства применяются в системах связи, телекоммуникаций, радиоуправления и метрологии.

Наиболее распространены маломощные СВЧ-устройства. Они решают задачи по формированию, передаче и приему информации с использованием СВЧ-излучения. Благодаря простоте изготовления и высокой технологичности наиболее распространенными являются маломощные СВЧ-устройства, выполненные на полосковой линии. Полосковые СВЧ-устройства изготавливаются в виде печатных плат, топология которых образует сверхвысокочастотные элементы. Так, длинная дорожка обладает высокой индуктивностью, а малый щелевой разрыв между проводниками имеет высокую емкость. Таким образом, при создании компьютерной модели полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров стоит вопрос о выборе программного обеспечения для реализации задач выпускной квалификационной работы.

Наиболее адаптированным для проектирования полосковых СВЧ-устройств является программный пакет AWR Design Environment [20]. Основным его модулем, используемым для проектирования СВЧ-устройств и расчета их характеристик является Microwave Office. Он предназначен для проектирования схем СВЧ-устройств, начиная от сборок различной степени сложности и заканчивая микросхемами. Модуль позволяет выполнять анализ (моделирование) линейных и нелинейных

схемных моделей. Результатом анализа схемных моделей являются графики характеристик СВЧ-устройства. Кроме того, возможна оптимизация характеристик в режиме реального времени, позволяющая контролировать изменение характеристик СВЧ-устройства при изменении параметров схемной модели. Модуль Microwave Office также позволяет выполнять анализ электромагнитной модели. Результатом анализа схемной или электромагнитной модели является топология устройства на печатной плате, которую можно экспортировать в программы, работающие с векторной графикой.

Сопоставив цели и задачи данной выпускной квалификационной работы и учитывая возможности программного комплекса AWR Microwave Office, было принято решение создавать СВЧ модели полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров в данной среде. Далее рассмотрим создание полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров в программном комплексе AWR Microwave Office.

Проектирование нового СВЧ-фильтра начинается с создания схемы с помощью команды New Schematic на панели инструментов. Модель полосно-заграждающего фильтра состоит из следующих элементов (рисунок 15):

- модель «MLIN» – представляет собой микрополосковую несимметричную линию передачи электромагнитных волн в воздушной или в диэлектрической среде, вдоль двух или нескольких проводников, имеющих форму тонких полосок и пластин;

- модель «MLEF» – представляет собой эффект открытого конца микрополосковой линии;

- модель «MTEE\$» – интеллектуальный микрополосковый T-образный переход.

Далее находим на панели элементов значок Port и размещаем их в начале и в конце схемы элементов.

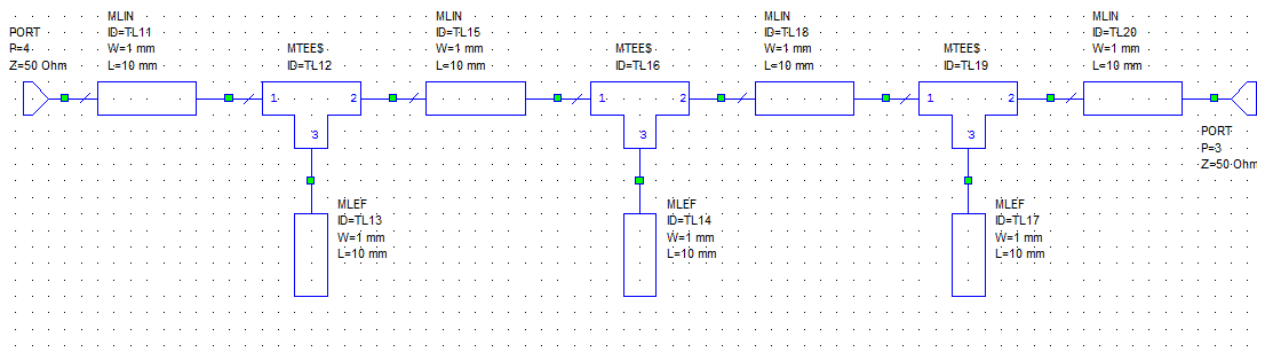


Рисунок 15 – Микрополосковые элементы схемы полосно-заграждающего фильтра

После построения элементов схемы необходимо определить параметры подложки. Для этого необходимо щёлкнуть по группе Substrates (Подложки) в окне просмотра элементов и перетащить элемент «MSUB» в окно схемы. Подложка имеет следующие параметры:

- ϵ_r – Относительная диэлектрическая проницаемость;
- H – толщина подложки;
- T – толщина проводника;
- R_{h0} – удельное сопротивление металла проводника, нормированное к золоту;
- Tang – тангенс угла потерь.

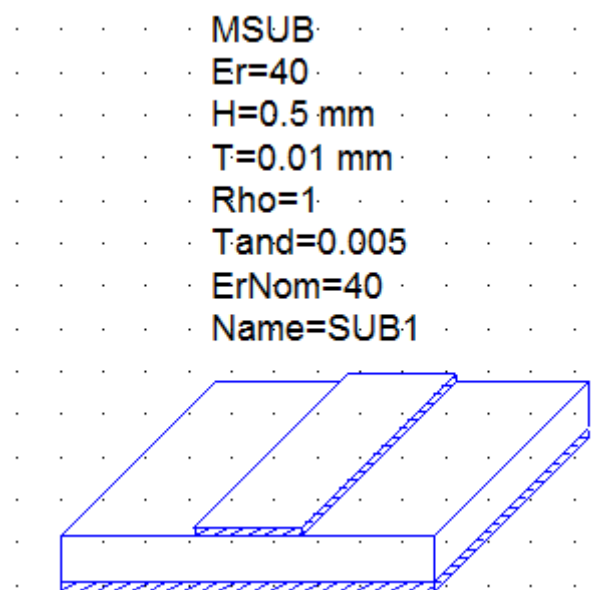


Рисунок 16 – Подложка «MSUB» с ее параметрами

Далее необходимо добавить переменные. При настройке или оптимизации одинаковым образом должны изменяться параметры второго и третьего элемента «MLIN» (расстояний между шлейфами), а также параметры первого и третьего элементов «MLEF». Для этого находим значок Equation на панели задач и добавляем в схему следующие переменные:

- переменная «LL» = 3,5 мм – длина второго и третьего элементов «MLIN»;
- переменная «WL» = 0,8 мм – ширина второго и третьего элементов «MLIN»;
- переменная «L1» = 3,5 мм – длина первого и третьего элементов «MLEF»;
- переменная «W1» = 0,8 мм – ширина первого и третьего элементов «MLEF»;

Полученная схема изображена на рисунке 17.

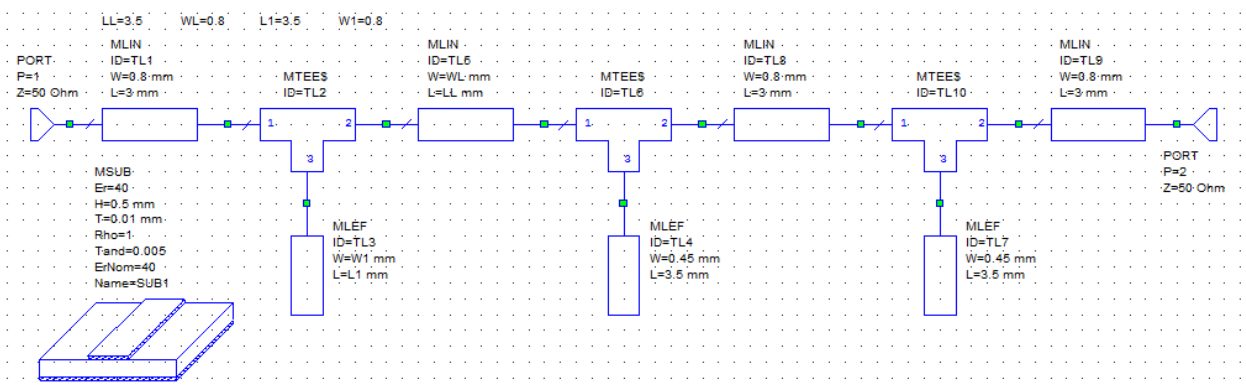


Рисунок 17 – Схема полосно-заграждающего фильтра

Следующим пунктом необходимо задать частоту для моделирования схемы полосно-заграждающего фильтра. Для этого нажимаем панель Project в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта. Далее открываем группу Project Options (Опции проекта) и открываем вкладку Frequencies (Частоты). Набираем 3 в поле Start (Начальная частота), 8 в поле Stop (Конечная частота) и 0,25 в поле Step (Шаг).

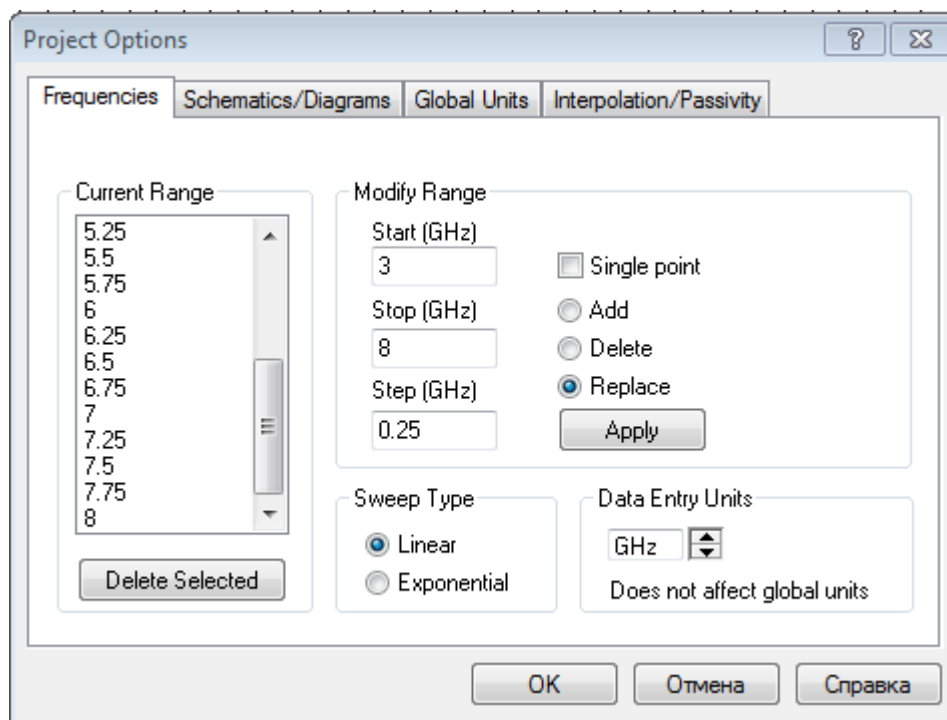


Рисунок 18 – Окно задания частоты проекта

После построения схемы элементов фильтра, задания переменных и задания частоты создаем график и добавляем измеряемые величины. Для этого щелкаем по значку Add New Graph на панели инструментов. Далее щелкаем правой кнопкой мыши по графику в окне просмотра проекта и выбираем пункт Add Measurement. Выбираем Port Parameters в списке Measurement type, далее параметр S в списке Measurement, 2 в поле To Port Index (Индекс входного порта), 1 в поле From Port Index (Индекс выходного порта). В области Complex Modifier (Модификатор комплексного числа) отмечаем Mag и dB. На рисунке 19 изображено окно Modify Measurement.

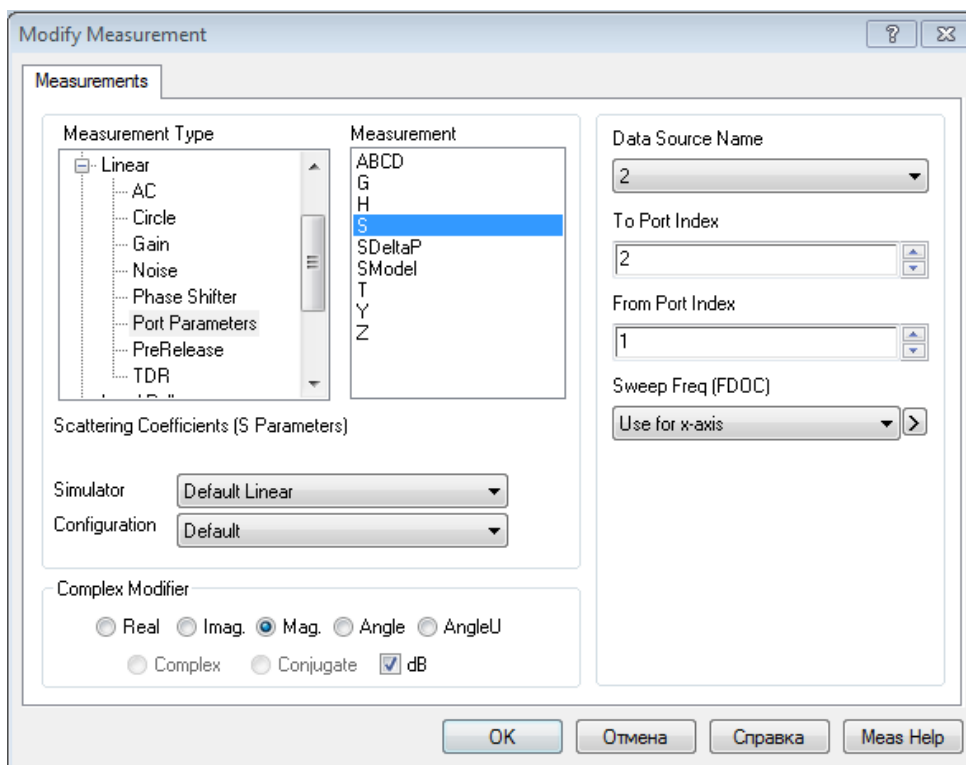


Рисунок 19 – Окно Modify Measurement графика проекта

После задания параметров графика нажимаем на значок Analyze на панели инструментов. На рисунке 20 изображены результаты анализа графика.

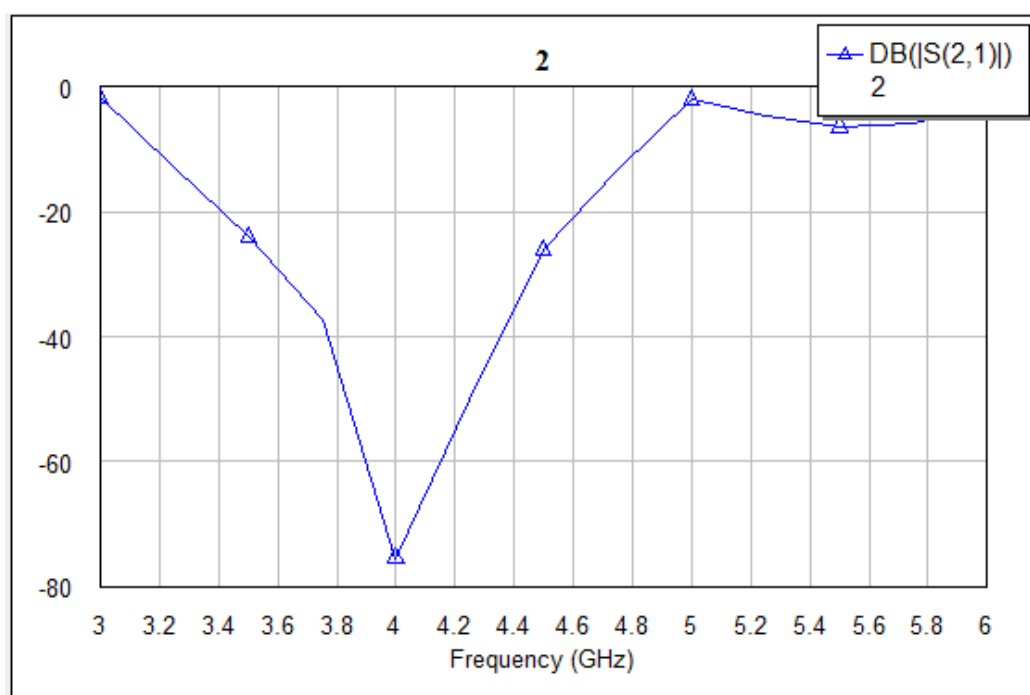


Рисунок 20 – График зависимости $S_{21} = f(F)$

Следующим шагом создадим топологию схемы. Находим значок View Layout (показать топологию) на панели инструментов, чтобы открыть окно топологии на рабочем поле. В этом окне будут отображены все элементы топологии, соответствующие каждому элементу схемы. Однако расположение топологических элементов может быть беспорядочным. Для предотвращения этого выделяем все элементы топологии и нажимаем на значок Snap Together (Привязать вместе) на панели инструментов. Расположение элементов топологии будет упорядочено, и топология будет иметь вид, показанный на рисунке 21.

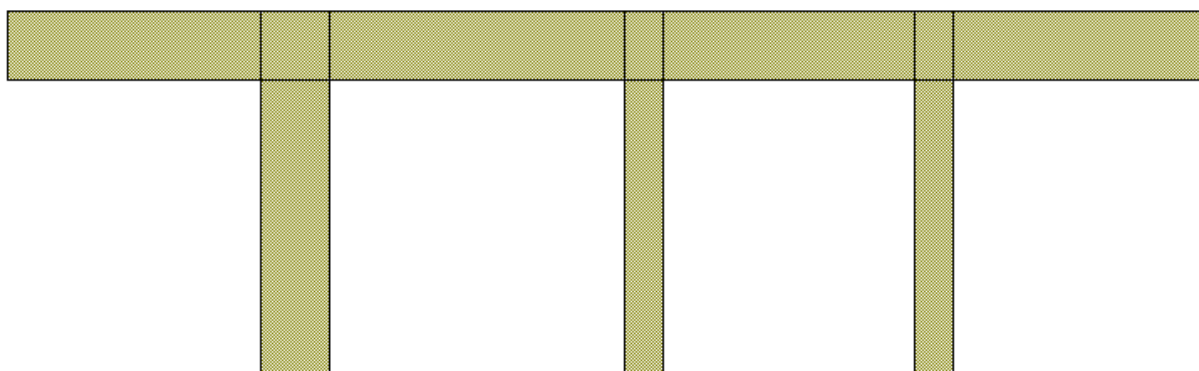


Рисунок 21 – Топология полосно-заграждающего фильтра

После создания топологии схемы полосно-заграждающего фильтра экспортируем топологию по умолчанию. В данном случае топология очень простая и состоит только из проводников, расположенных на одном уровне. Выбираем в меню Layout и Export. Откроется диалоговое окно «Export Layout». В этом окне выбираем папку для сохранения файла топологии.

1.2 Метаматериал на основе грибовидной полосно-заграждающей структуры

В последние годы рядом отечественных и зарубежных фирм проявлен интерес к исследованиям и разработкам СВЧ-устройств на метаматериалах – искусственных периодических структурах с модифицированными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, позволяющих обеспечивать управление законами распространения и дисперсии электромагнитных волн [17-18].

Изменение основных параметров метаматериалов – формы, размеров, постоянного и переменного периода электродинамической структуры, дает возможность создавать композитные высокоимпедансные поверхности, находящие применение в качестве резонаторов, фильтров, фазовращателей, направленных ответвителей, антенных и других СВЧ-устройств. К наиболее интересным и важным свойствам метаматериалов следует отнести возможность получения на их основе отрицательного коэффициента преломления, который достигается при одновременных отрицательных диэлектрической и магнитной проницаемостей структуры [19].

Метаматериал с грибовидной структурой впервые описан в работе [10]. Он конструктивно представляет собой экранированную с одной стороной однослойную диэлектрическую плату с периодически расположенными рядами сквозных отверстий, в каждом из которых закреплены идентичные металлические элементы в виде распределенных колебательных контуров, связанных емкостными зазорами, и имеющих геометрические размеры, много меньше рабочей длины волны.

Интерес к исследованию грибовидных полосно-заграждающих структур обусловлен перспективностью их использования для создания частотно селективных СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками для пространственных фильтров развязки элементов в антенных решетках [11]. Однако, наряду с обладанием уникальными свойствами [12,13], грибовидные

метаматериалы имеют недостаток – узкую рабочую полосу, что объясняется их резонансной природой.

В работе [4] проведен анализ физических особенностей метаматериалов и конструкций частотно-селективных СВЧ-устройств, выполненных на основе грибовидных полосно-заграждающих структур.

На рисунке 22 показан распределительный колебательный контур грибовидного метаматериала.

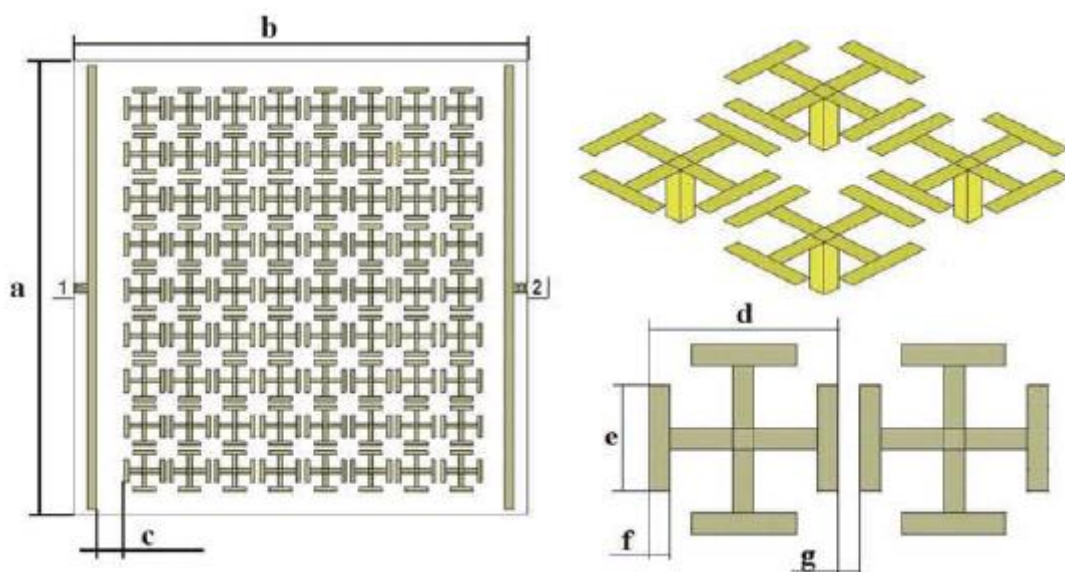


Рисунок 22 – Контур грибовидного метаматериала [4]

Размеры : $a = b = 100$ мм; $c = 7$ мм; $d = 9$ мм; $e = 5$ мм; $f = g = 1$ мм.

Эквивалентная схема распределительного колебательного контура грибовидного метаматериала (рисунок 23) содержит индуктивности, образованные цилиндрическими металлическими ножками, соединенными с экраном, и емкости, сформированные между соседними контурами. Такая конструкция представляет собой линию передачи с отрицательной дисперсией. Каждый из идентичных колебательных контуров при изменении геометрических размеров может иметь резонансную частоту от 0,1 до 100 ГГц.

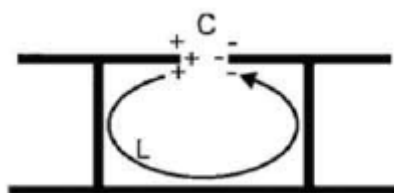


Рисунок 23 – Эквивалентная схема полосно-заграждающей структуры [4]

Частотные-селективные свойства метаматериала подтверждаются результатами численного эксперимента, полученного с помощью программной среды AWR Microwave Office v. 9.0. На рисунке 24 показаны зависимости комплексного коэффициента передачи S_{21} от частоты, полученные для структуры с импедансной металлической поверхностью (кривая 1) и частотно-селективной структуры с топологией, выполненной по рисунку 36 на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,4$ и толщиной 2 мм (кривая 2).

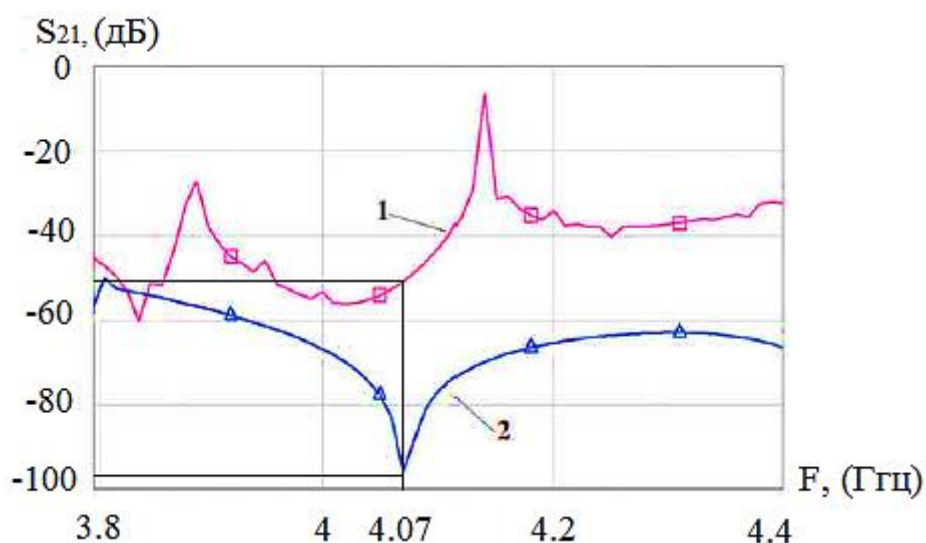


Рисунок 24 – Зависимости параметра $S_{21} = f(F)$ [4]

Сравнение данных характеристик показывает рост затухания колебаний у метаматериала (95,9 дБ против 50,8 дБ, обеспеченных импедансной поверхностью) на частоте резонанса 4,07 ГГц.

Экспериментальное исследование частотно-селективного СВЧ-устройства выполнено с помощью векторного анализатора ZVB-4. Макет однослойной грибовидной полосно-заграждающей структуры, изготовленный на основе печатной платы из стеклотекстолита $\varepsilon = 4,6$ с габаритными размерами 100x50 мм и толщиной 2 мм, показан на рисунке 25. Геометрические размеры крестообразных проводников соответствуют рисунку 22.

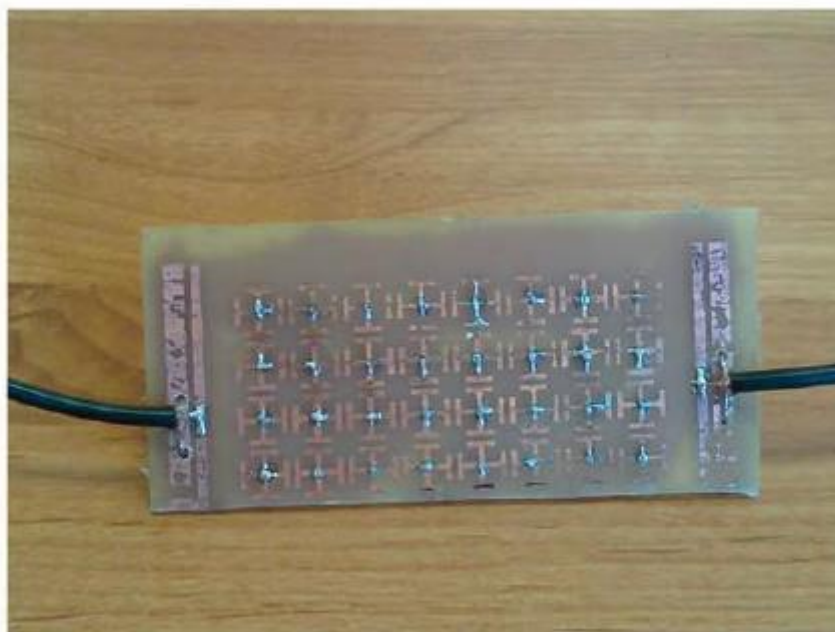


Рисунок 25 – Экспериментальный макет полосно-заграждающей структуры на основе метаматериала [4]

Результаты численного моделирования (кривая 1), выполненного в программном комплексе AWR Microwave Office и эксперимента (кривая 2), показаны на рисунке 26.

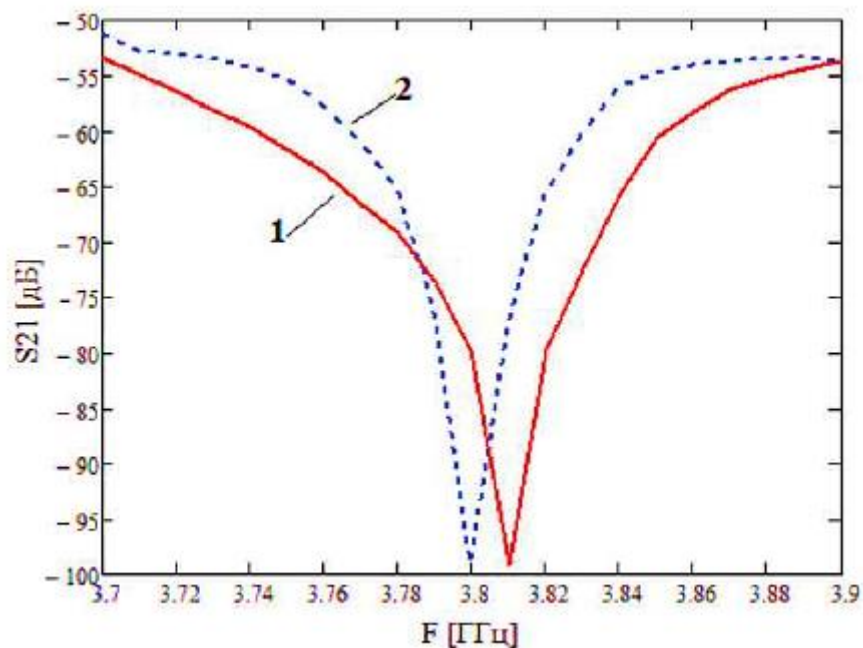


Рисунок 26 – Зависимости $S_{21} = f(F)$ для макета полосно-заграждающей структуры на метаматериале

где 1 – рассчитанная численно в программе AWR; 2 – полученная экспериментально [4].

Сравнительный анализ полученных кривых показывает, что затухание комплексного коэффициента передачи S_{21} , полученное численно, составляет 99,2 дБ на резонансной частоте 3,81 ГГц, а измеренное экспериментально – 99 дБ а частоте 3,8 ГГц. Разница в резонансных частотах составляет 9 МГц (0,25%), что вызвано погрешностями изготовления макета и находится в допустимых пределах.

1.3 Проектирование полосно-пропускающего фильтра в программном комплексе Microwave Office

Для создания полосно-пропускающего фильтра развернем группу Wizards и выберем iFilter Filter Wizard. Далее после открытия группы необходимо в основном окне в области Design Control выбрать Environment

Options. В открывшемся окне на вкладке Units выбираем единицы измерения, как показано на рисунке 27.

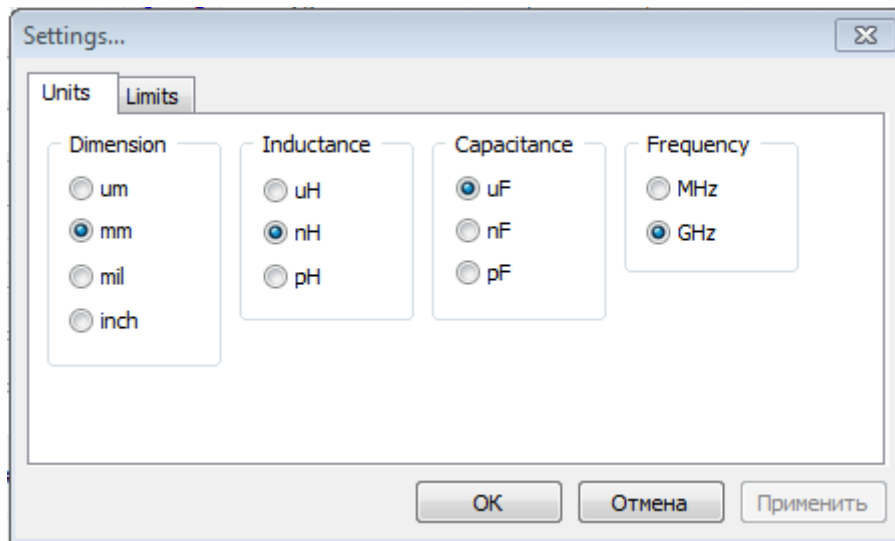


Рисунок 27 – Окно выбора единиц измерения Units

Далее необходимо выбрать тип фильтра. Для этого в основном окне в области Type-Approxation был отмечен Band-pass и Lumped. В левом окне списка типов фильтра Main Filter Type был отмечен Narrowband Lumped Filter (Узкополосный фильтр). В правом окне списка опций Options выбран Capacitive (identical shunt L) – емкостной (идентично параллельной L) для синтеза фильтра с емкостными связями. На рисунке 28 изображено окно выбора фильтра.

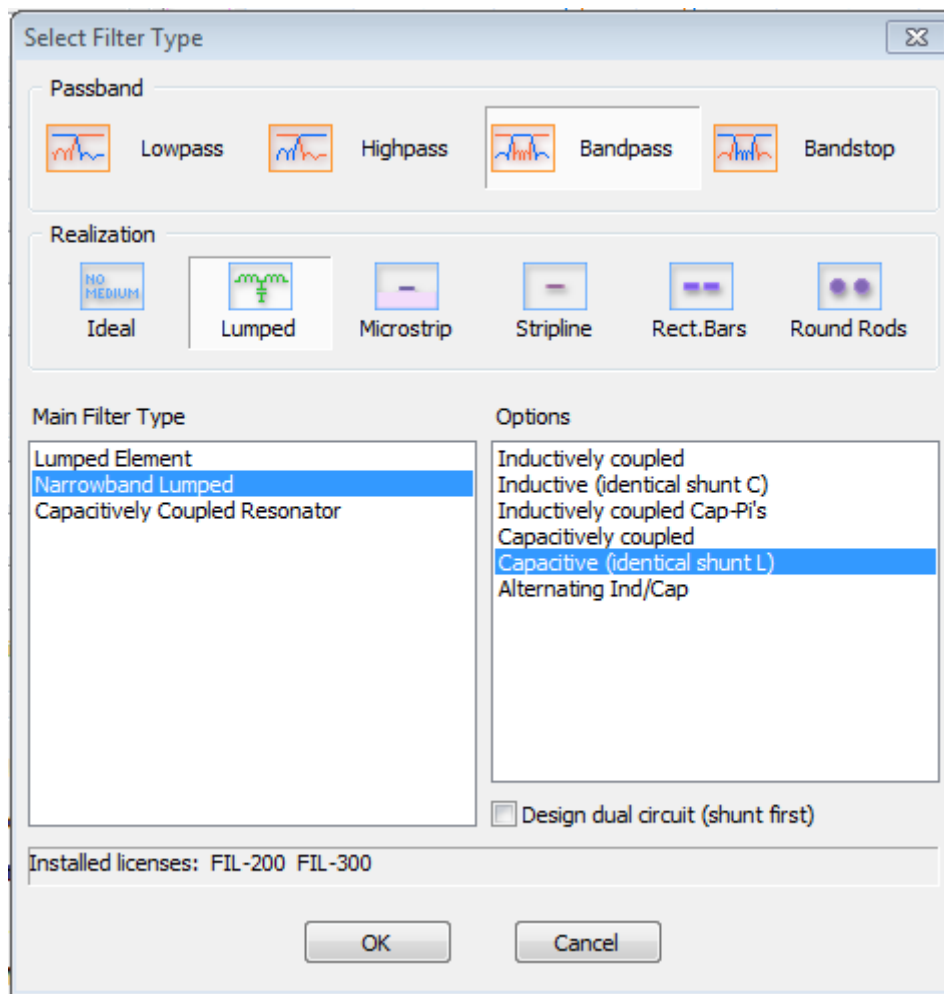


Рисунок 28 – Окно выбора типа фильтра

После определения типа фильтра в основном окне в области Type-Approximation выбираем тип характеристики Chebyshev. В поле Ripple [dB] вводим величину пульсаций в полосе 0,01. В области Specifications вводим порядок фильтра (Degree) 6, центральную частоту (F0[GHz]) 1,6, ширину полосы пропускания (BW[GHz]) 0.5, сопротивления источника и нагрузки 50.

Внизу под графиком щёлкаем по кнопке Add, чтобы добавить маркеры. В открывшемся окне (рисунок 29) в области Data Type отмечаем Insertion Loss, в поле Fmin [GHz] вводим 1,6.

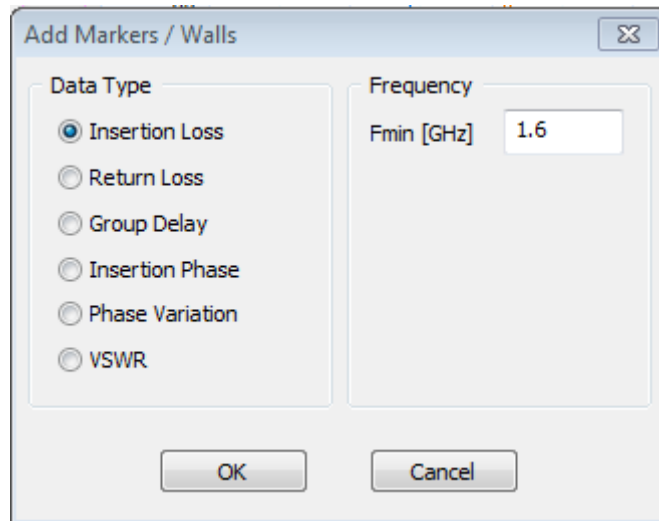


Рисунок 29 – Окно добавления маркеров графика

На рисунке 30 показано основное окно создания полосно-пропускающего фильтра в iFilter.

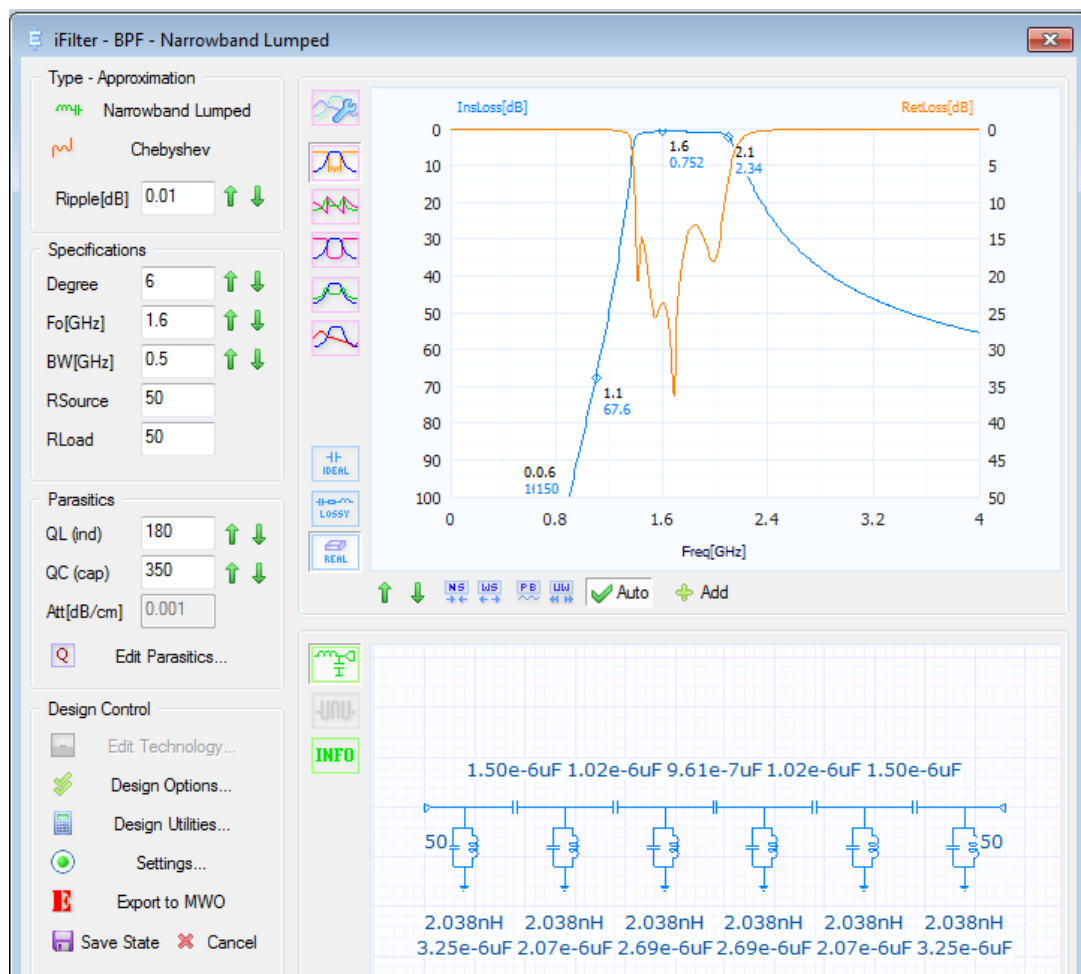


Рисунок 30 – Окно создания полосно-пропускного фильтра в iFilter

Далее необходимо оценить влияние возможных потерь катушки индуктивности. Стоит обратить внимание, что в этом типе фильтра все индуктивности в резонаторах имеют одно и то же значение индуктивности. Таким образом, в фильтре потребуется только один тип катушки индуктивности. Начнем с оценки возможной добротности индуктивности и конденсаторов. Для этого выбираем Design Utilities в основном окне iFilter. В открывшемся окне (рисунок 31) на вкладке Air Coil (витая катушка) вводим 1 в поле Number of Turns (количество витков), 1 в поле Coil inner dia[mm] (внутренний диаметр), 2 в поле Frequency[GHz]. В поле Use AWG вводим тип провода awg32 (американский стандарт), который имеет диаметр 0,2 мм. Получаем, что можно ожидать добротность катушки 180.

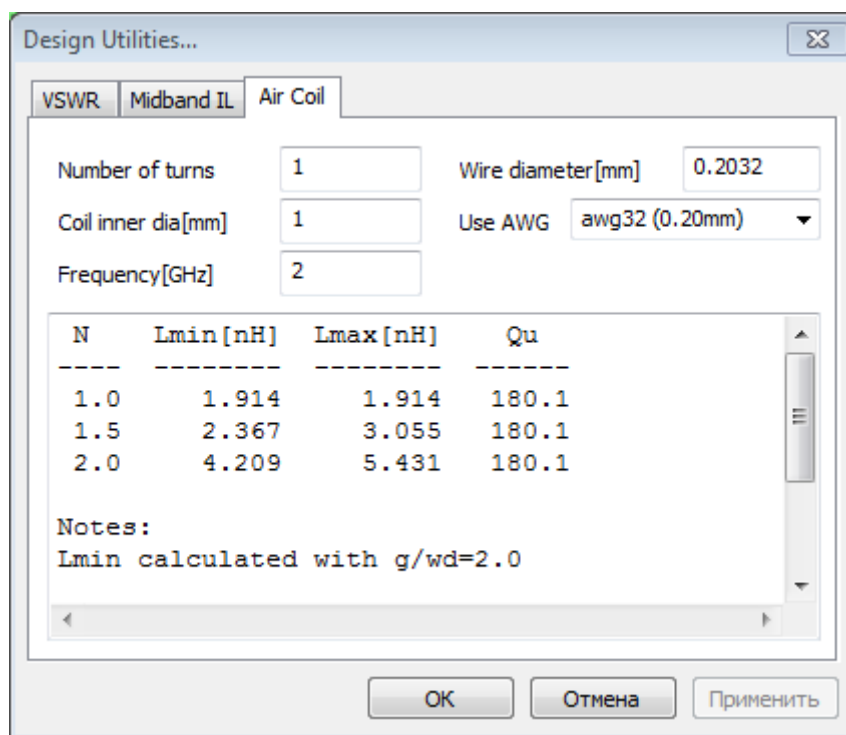


Рисунок 31 – Окно характеристики катушки индуктивности

Следующим шагом учитываем влияние потерь, используя данные поставщиков элементов. Для этого заходим в Design Options в основном окне iFilter. На вкладке Realization в области Inductors отмечаем (1-10 nH) и отмечаем Inductor Vendors. В поле L[nH] было введено 2,25, в поле Freq 1600.

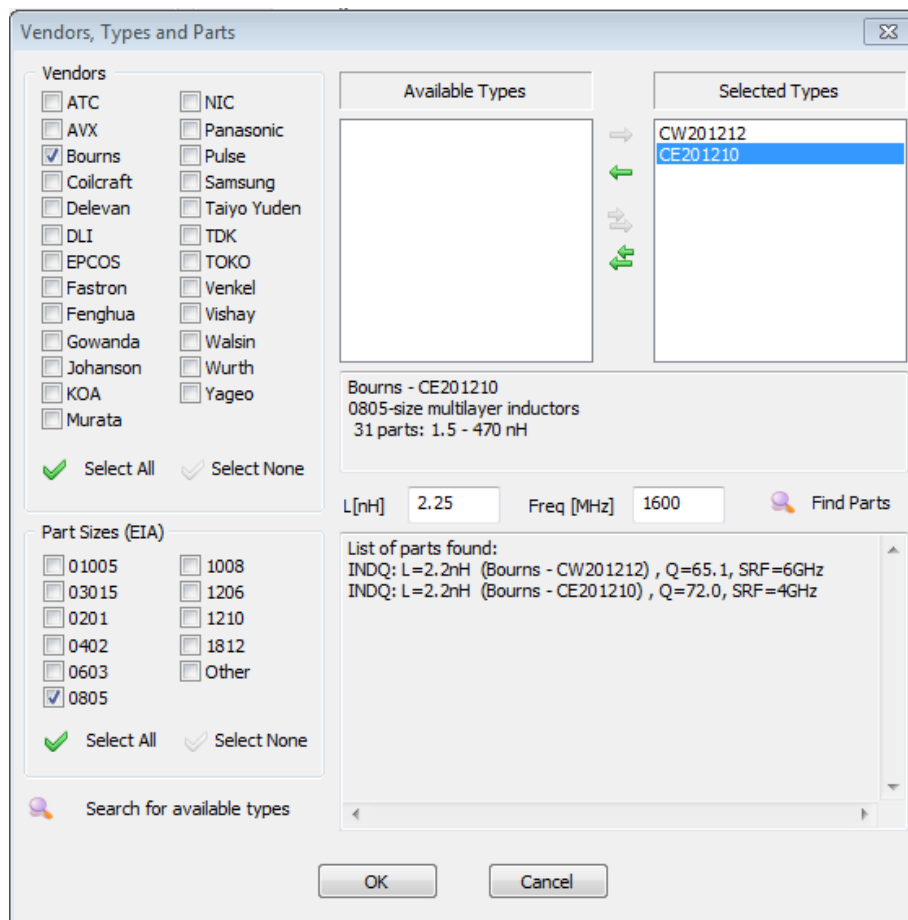


Рисунок 32 – Окно выбора производителей катушек

Выбранные типы катушки индуктивности и конденсаторов представлены на рисунке 33.

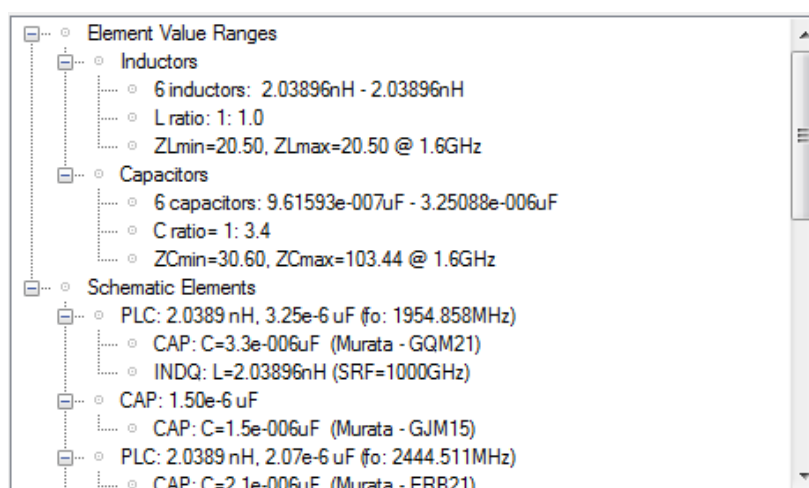


Рисунок 33 – Окно элементов синтезированной схемы фильтра

После создания схемы полосно-пропускающего фильтра в iFilter Filter Wizard, ее можно экспортировать в Microwave Office. Схема полосно-пропускающего фильтра представлена на рисунке 34.

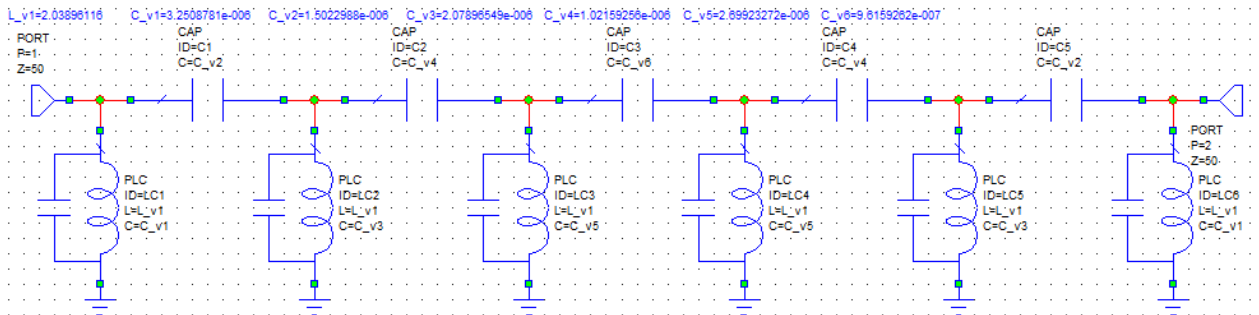


Рисунок 34 – Схема полосно-пропускающего фильтра

После построения схемы элементов фильтра, задания переменных и задания частоты создаем график и добавляем измеряемые величины. Выбираем Port Parameters в списке Measurement type, далее параметр S в списке Measurement, 2 в поле To Port Index (Индекс входного порта), 1 в поле From Port Index (Индекс выходного порта). В области Complex Modifier (Модификатор комплексного числа) отмечаем Mag и dB.

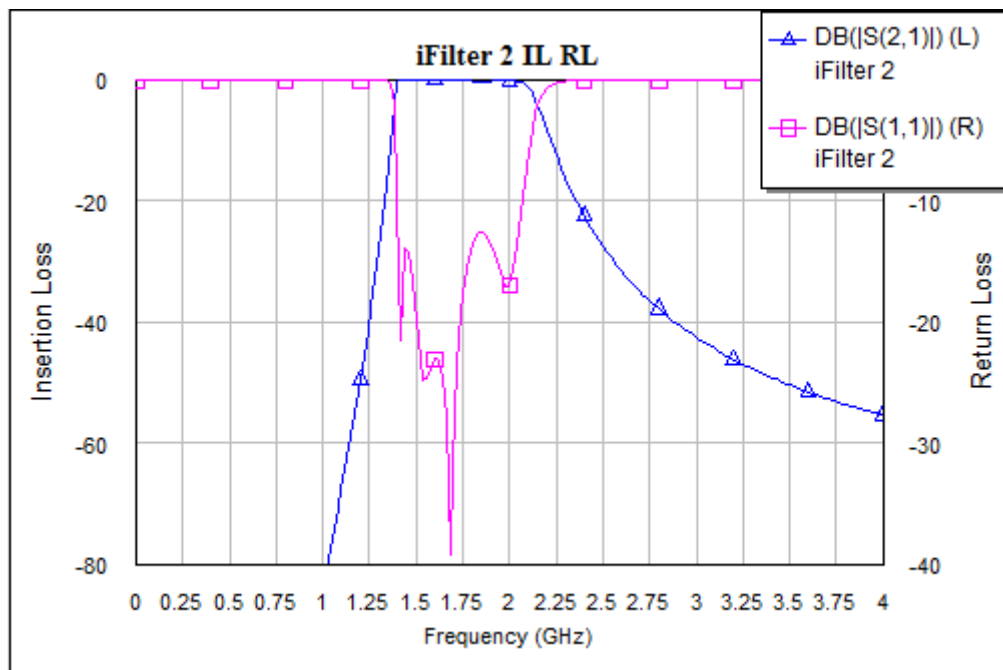


Рисунок 35 – График зависимостей $S_{21} = f(F)$ и $S_{11} = f(F)$

1.4 Полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода на основе метаматериала

К основным недостаткам фильтров можно отнести большие габаритные размеры и достаточно узкий рабочий диапазон частот. Одним из известных подходов к решению проблемы компактности и широкополосности является переход от фильтров простого прямоугольного и круглого сечения к фильтрам с поперечным сечением сложной формы [14-16].

СВЧ фильтры сложного сечения приобретают новые свойства за счет изменения структуры электромагнитного поля в зависимости от формы поперечного сечения. Так, например, отдельный класс составляют полосно-пропускающие фильтры с регулярными металлическими гребнями, наиболее популярными из которых являются П-волноводы и Н-волноводы с двумя прямоугольными гребнями.

На рисунке 36 изображен полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода на основе метаматериала с зависимостью модулей S-параметров (здесь и далее S_{11} – сплошная линия, S_{21} – пунктирная линия) от нормированного волнового числа.

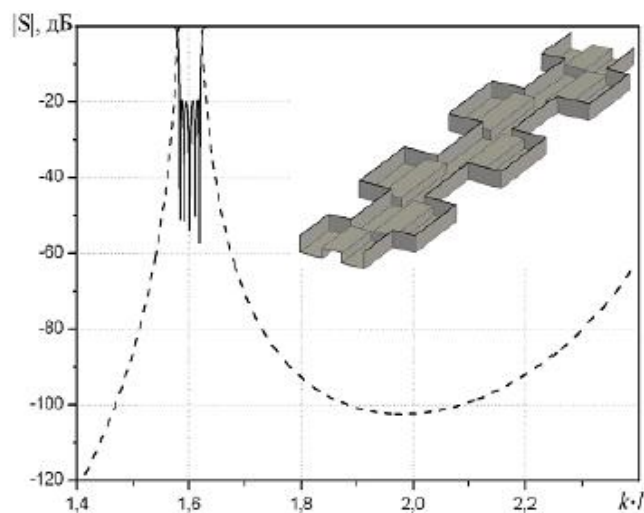


Рисунок 36 – Полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода [3]

На рисунке 37 изображен полосно-пропускающий фильтр на П-волноводе с коаксиальными выходами.

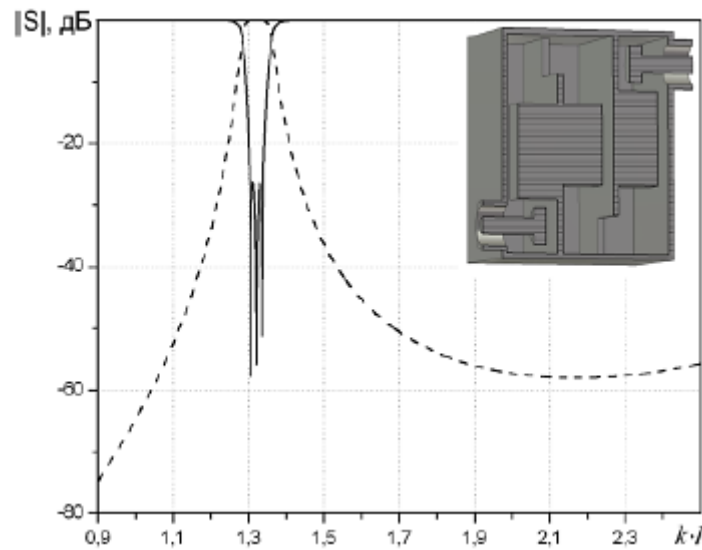


Рисунок 37 – Полосно-пропускающий фильтр на П-волноводе с коаксиальными выходами [3]

Помимо изобретенных П-образных и Н-образных полосно-пропускающих фильтров с двумя прямоугольными гребнями, появление в элементной базе СВЧ L-образного фильтра со сложными гребнями позволило не только дополнительно уменьшить габаритные размеры и увеличить диапазон одномодового режима по сравнению с П- и Н-волноводами, но и получить ряд новых свойств для устройств, проектируемых на их основе, в частности для частотно-селективных устройств [14-16]. К таким свойствам можно отнести заметное увеличение добротностей резонаторов, расширение полосы запираия и уровня затухания в ней. Более того, дополнительное повышение компактности устройств может быть достигнуто за счет изгибов и разворотов волноводного тракта, например, путем построения многоуровневых конструкций. Базовым элементом волноводных частотно селективных устройств чаще всего являются плоско-поперечные неоднородности, такие как сдвиги и стыки

волноводов различного поперечного сечения, а также тонкие металлические диафрагмы.

На рисунке 38 изображен фильтр на прямоугольных волноводах с двумя L-образными металлическими гребнями.

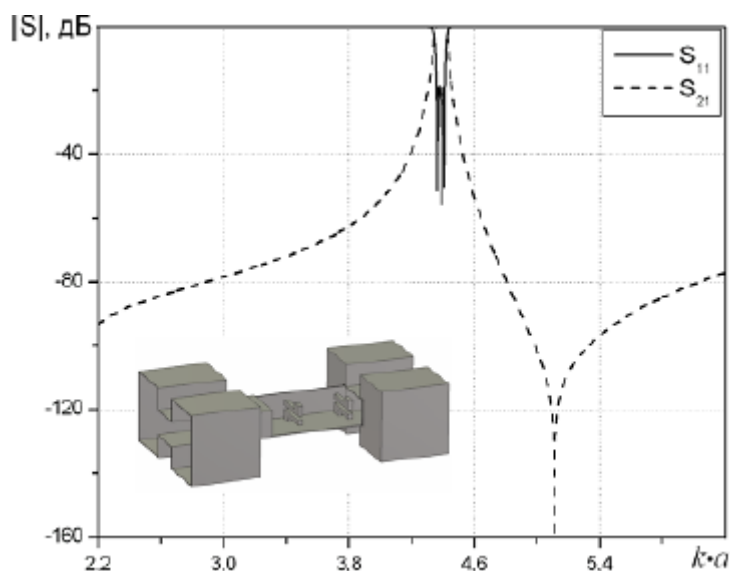


Рисунок 38 – Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольных волноводах с двумя L-образными металлическими гребнями [3]

Бурное развитие за последние два десятилетия специализированных программных пакетов компьютерного моделирования различных высокочастотных радиотехнических задач прямыми численными методами, например, использованный в данной выпускной-квалификационной работе программный комплекс AWR Microwave Office, позволяет на сегодняшний момент решить в строго постановке практически любую задачу анализа многих полосно-пропускающих фильтров, в том числе и на волноводах со сложным поперечным сечением. Однако, как показывают многочисленные исследования, решение задач синтеза, особенно в случае наличия большого числа свободных параметров геометрии, оказывается практически невыполнимо в отсутствие хорошего начального приближения, поскольку либо требует огромного времени счета, либо вообще не приводит к

конечному результату. Поэтому, развитие базы численно-аналитических методов и поиск новых прототипов, позволяющих с достаточно высокой скоростью и точностью решать широкий круг задач, связанных с электродинамическим анализом и синтезом ряда ключевых радиотехнических устройств на волноводах сложного сечения является важной и востребованной задачей для разработчиков аппаратуры сантиметрового и миллиметрового диапазонов [3].

4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЛЬТРОВ С КОНСТРУКЦИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

4.1 Сравнительный анализ полосно-заграждающего фильтра с конструкцией на основе метаматериала

Для проведения сравнительного анализа сверхвысокочастотных фильтров с аналогами на основе метаматериалов необходимо определить параметры, по которым данные устройства будут сравниваться.

Одним из основных инструментов процесса разработки радиоэлектроники является использование измерений S -параметров. Эти измерения можно использовать в современных средствах автоматизированного проектирования радиоэлектроники в качестве составной части процесса моделирования цепей [21].

S -параметры – элементы матрицы рассеяния многополюсника, описывающее обычно радиотехническое устройство. Матрица рассеяния – матрица, элементы которой описывают физические параметры рассеяния. В технике СВЧ матрица рассеяния связывает линейной зависимостью падающую и отраженную волны на входах многополюсника [22].

Элементы матрицы рассеяния многополюсника представляют собой набор величин, связывающих между собой падающие и отраженные волны у полюсов многополюсника. Такая матрица описывает поведение СВЧ устройства при любых заданных значениях его нагрузки. Элементы, расположенные по главной диагонали матрицы, представляют собой коэффициенты отражения, в то время как элементы другой диагонали являются коэффициентами передачи.

Каждый вход описываемого многополюсника в технике СВЧ принято представлять в виде линии передачи с основным типом волн. Следовательно, на каждом входе многополюсника существуют как падающая a , так и

отраженные b волны. Отраженные волны связаны с падающими линейными зависимостями.

$$\begin{cases} b_1 = S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2 + \dots + S_{1N} \cdot a_N \\ b_2 = S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2 + \dots + S_{2N} \cdot a_N \\ b_N = S_{N1} \cdot a_1 + S_{N2} \cdot a_2 + \dots + S_{NN} \cdot a_N \end{cases} \quad (3.1)$$

Если представить падающие и отраженные волны на входах многополюсника в виде векторов a и b :

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_N \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_N \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

В этом случае линейные зависимости, указанные выше, можно записать в матричной форме:

$$b = S \cdot a \quad (3.3)$$

где S – матрица рассеяния.

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Для сравнительного анализа воспользуемся зависимостями комплексного коэффициента передачи от частоты $S_{21} = f(F)$ полосно-заграждающего СВЧ фильтра обычной конструкции (рисунок 39а) и грибовидной полосно-заграждающей структуры на метаматериале (рисунок 39б).

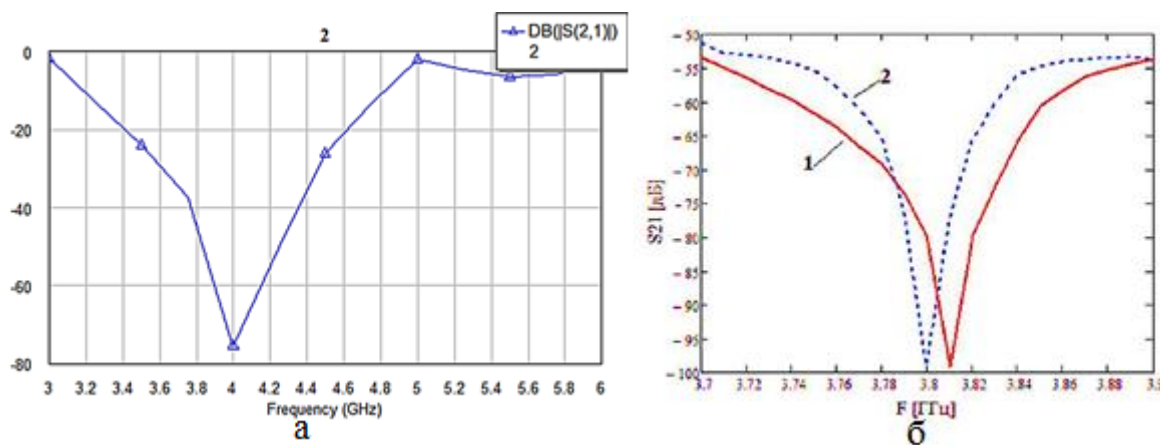


Рисунок 39 – Зависимости $S_{21} = f(F)$ для полосно-заграждающего фильтра (а) и полосно-заграждающей структуры на метаматериале (б)

Сравнение результатов расчета показывает, что грибовидная полосно-заграждающая структура (рисунок 39б) имеет больший по сравнению с полосно-заграждающим фильтром уровень затухания до -98 дБ, и обеспечивает развязку на уровне -80 дБ в полосе заграждения $3,79 - 3,81$ ГГц. Таким образом грибовидная полосно-заграждающая структура при тех же размерах, мощности и на той же частоте показывает более высокий уровень затухания на 20 дБ больше, чем аналог обычного СВЧ фильтра. Однако минусом данной технологии является более суженая рабочая полоса заграждения по сравнению с СВЧ фильтром (рисунок 39а).

4.2 Сравнительный анализ полосно-пропускающего фильтра с конструкцией на основе метаматериала

Как отмечалось ранее, частотные фильтры предназначены для селекции (выделения или подавления) частей спектра сигналов и являются неотъемлемыми компонентами большинства классов радиоэлектронной аппаратуры, используются в измерительных приборах в метрологии и так далее. Наблюдаемое в течение последних десятилетий ужесточение требований к эффективности использования полосы частот от единиц до

десятков ГГц, используемой средствами навигации, локации и связи, заставляет производителей улучшать электрические характеристики частотных фильтров (вносимые ими потери, прямоугольность частотной характеристики, время задержки сигнала и прочие), не ухудшая при этом остальных эксплуатационных и экономических параметров.

На данный момент микрополосковая линия – одно из наиболее используемых технологических решений в СВЧ-технике. Благодаря ряду преимуществ, среди которых можно выделить, например, малые размеры, простоту изготовления печатным методом и высокую надежность, на основе микрополосковой линии передачи создаются новейшие полосно-заграждающие фильтры [4].

На рисунке 40 показаны зависимости полосно-пропускающего фильтра (рисунок 40а) с конструкцией фильтра на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода (рисунок 40б). А именно сравнительные характеристики зависимости коэффициента отражения $S(1,1)$ и коэффициента передачи $S(2,1)$ от частоты, приведены на рисунках, соответственно.

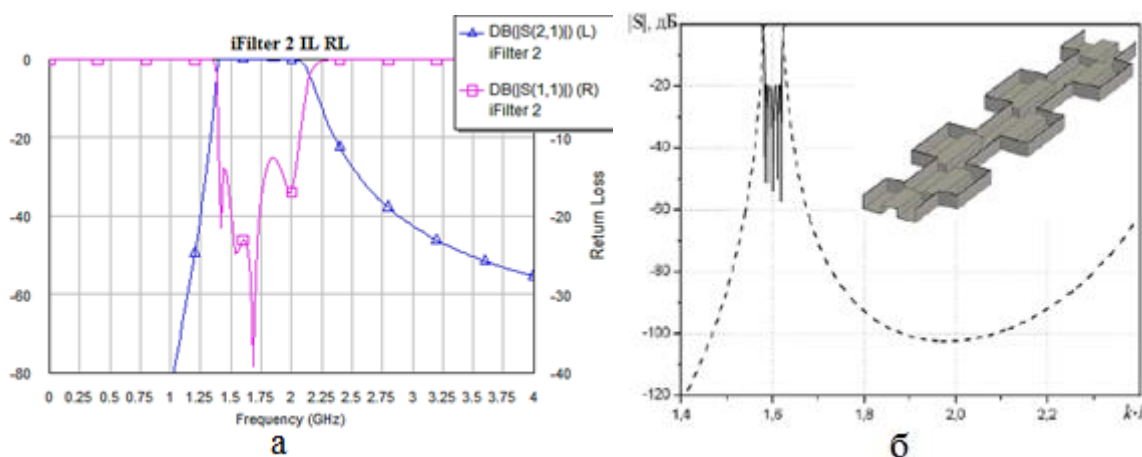


Рисунок 40 – Зависимости для полосно-пропускающего фильтра (а) и полосно-пропускающей структуры на метаматериале (б)

Полосно-пропускающий СВЧ фильтр (рисунок 40а) был построен в программном комплексе AWR Microwave Office с настройкой в дополнительном пакете iFilter Filter Wizard. Вычислительный эксперимент проводился для модели с учетом потерь. В ходе моделирования удалось получить значение модуля коэффициента отражения ниже -50 дБ в полосе пропускания на частоте 1,75 ГГц. Полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода на основе метаматериала (рисунок 40б) в свою очередь позволяет пропускать значение модуля коэффициента отражения около -20 дБ в полосе пропускания на частоте 1,6 ГГц. Модель на метаматериале имеет те же геометрические размеры, что и модель СВЧ фильтра, однако в ней учитываются проводимость металла и потери в диэлектрике, что приводит к некоторым расхождениям в расчетах.

Таким образом, главным широко распространенным недостатком компактных фильтров на полосковой линии является их узкополосность. В широкополосных фильтрах такой конструкции возникают трудности с реализацией сильных связей между резонаторами, поскольку зазоры между проводниками слишком малы для стандартной технологии печатных плат. В нижней части СВЧ-диапазона эти фильтры недостаточно компактны.

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

5.1 Цели проекта

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Темой научно-технического исследования является применение метаматериалов в первичных измерительных преобразователях.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации [24].

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- Рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- Произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

5.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок. В современном обществе метрология как наука и область практической деятельности играют большую роль. Это связано с тем, что практически нет ни одной сферы человеческой деятельности, где бы не использовались результаты измерений. В нашей стране ежедневно выполняется свыше 20 млрд различных измерений [25].

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается применение метаматериалов в полосно-пропускающих и полосно-заграждающих сверхвысокочастотных фильтрах. Данные фильтры применяются в контрольно-измерительной аппаратуре, СВЧ-узлах и модулях, усилителях, микроэлектроники и т.д.

Сегменты рынка. Основными сегментами, на которые необходимо ориентироваться, являются ряд компаний, занимающийся разработкой СВЧ техники. Примером могут служить следующие компании: ООО «Микран» находящаяся в г. Томске, АО «Росэлектроника», АО «Микроволновые системы», АО «Исток» и др. Разработанная модель полосно-пропускающих и полосно-заграждающих СВЧ фильтров в программном комплексе AWR Microwave Office может быть далее усовершенствована в рассматриваемых ранее компаниях.

Карта сегментирования рынка показана в таблице 1.

Таблица 1 – Карта сегментирования потребителей

Потребители	Модель полосно-пропускающего фильтра	Модель полосно-заграждающего фильтра
Производители СВЧ устройств	+	+
Потребители контрольно-измерительных приборов	+	+

5.3 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку

сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 2.

Для проведения данного анализа сравнение проводится между полосно-пропускающим фильтром от компании «Микран» и новейшей технологии применения метаматериалов в СВЧ фильтрах, рассматриваемая в данной работе.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Рассмотрим технические и экономические критерии оценки ресурсоэффективности, используемые для сравнения конкурентных технических решений:

- помехоустойчивость – способность устройства выполнять свои функции при наличии помех. Данный критерий является одним из важнейших в СВЧ-технике, особенно в полосно-пропускных фильтрах, так как при слабой помехоустойчивости устройство неспособно обеспечивать необходимый уровень заграждения сигналов;

- КПД – коэффициент полезного действия отражает характеристику эффективности устройства в отношении преобразования или передачи энергии. Полосно-пропускной фильтр, являясь элементом метрологического датчика, преобразует электрическую энергию и КПД устройства напрямую определяет ряд важнейших характеристик датчика, а также ценную политику устройства;

- надежность – данный критерий рассматривается с позиции долговечности устройства и способности работать в разных рабочих средах при повышенном давлении, температуре и т.д.;

- энергоэкономичность – данный критерий необходим в условиях сбережения потребления устройством электрической энергии;
- функциональность – параметр, характеризующий набор возможностей, которые предоставляет данное устройство;
- конкурентоспособность продукта – способность определённого объекта превзойти конкурентов в заданных условиях. Сравнение происходит с полосно-пропускным фильтром на основе технологии метаматериала и свч-фильтром компании «Микран»;
- финансирование научной разработки определяет степень капитализации технологии на основе метаматериалов и внедрение ее в технологическое производство;
- цена является коэффициентом обмена конкретного товара на деньги. Рассматривается вариант сравнения цен с устройствами от компании «Микран», которые были взяты с их официального сайта.

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		$B_{\text{Микран}}$	$B_{\text{Мета}}$	$K_{\text{Микран}}$	$K_{\text{Мета}}$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Помехоустойчивость	0,05	3	4	0,15	0,2
2. КПД	0,1	3	5	0,3	0,5
3. Надежность	0,05	4	2	0,2	0,1
4. Энергоэкономичность	0,1	4	3	0,4	0,3
5. Функциональность	0,1	3	5	0,3	0,5
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,2	5	4	1	0,8
2. Финансирование научной разработки	0,2	3	5	0,6	1
3. Цена	0,2	5	3	1	0,6
Итого	1			3,95	4

Итог данного анализа: Использование новейшей технологии применения метаматериалов повышает ряд параметров свч-устройств, способной создать новые приборы, применяемые в метрологии. Таблица 2 показывает незначительное, но более эффективное использование

технологии метаматериалов. Однако внедрение возможно только тогда, когда НИИ освоют различные аспекты данной технологии, подготовят высокопрофессиональные кадры и бюджет производства станет в разы дешевле.

5.4 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT–анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 3 – SWOT – анализ

Возможности/угрозы	Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
	С1. Улучшение характеристик СВЧ-устройства; С2. Разнообразное применение технологии; С3. Простота эксплуатации; С4.Повышение КПД, вследствие развития технологий.	Сл1. Дороговизна технологии; Сл2. Слабый уровень проникновения на рынок; Сл3. Требуется высокотехнологичное оборудование для производства СВЧ-устройств.
Возможности (O):	Мероприятия (S–O)	Мероприятия (W–O)
В1. Освоение новой ветви в метрологии и электроники России; В2. Повышение ряда параметров в ГГц диапазоне; В3. Увеличение КПД; В4. Поддержка со стороны государства (возможность бюджетного финансирования или уменьшение налогообложения);	1. Активная маркетинговая политика с акцентом на новую технологию; 3. Использование метаматериалов в ряде технологичных микроэлектронных компаний и для Вооруженных Сил РФ.	1. Разработка подробной стратегии продвижения на рынок с привлечением соответствующих специалистов; 2. Нахождение способов удешевить производство создания плат на основе метаматериалов;
Угрозы (T):	Мероприятия (S–T)	Мероприятия (W–T)
У1. Недостаточное тестирование технологии; У2. Отсутствие доверия к технологии на рынке потребителей;	1. Улучшение надежности и качества устройств по мере развития технологий; 2. Постепенный переход на новую технологию	1. Создание и публикация научных статей производителем, показывающих преимущества разработки;

УЗ. Недостаточная надежность, проверенная полным сроком эксплуатации технологии метаматериалов.	2. Полное гарантийное обслуживание, выдаваемое потребителю на весь срок эксплуатации продуктом. 3. Получение кредитов от инвесторов и выдача субсидий от государства.
---	--

Вывод: Технология построения СВЧ-устройств на основе метаматериалов имеет большой потенциал, однако необходимо постепенно внедрять данную технологию с проведением ряда маркетинговых мероприятий и отслеживанием круга потенциальных потребителей, а также заручением экономической помощи от государства в виде кредитов и др. финансирования.

5.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснение уровня ее завершения. Для этого заполняется специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно–технический задел	2	2
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно–технического задела	3	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	1
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	1

6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
ИТОГО БАЛЛОВ:		33	34

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению; B_i – балл по i –му показателю.

Перспективность выше среднего, следовательно, необходимо устранять имеющиеся пробелы, а именно: провести дополнительно оценку стоимости интеллектуальной собственности, лучше ознакомиться с рынками сбыта, проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок, продумать вопрос финансирования разработки, а также состав команды для его реализации.

5.6 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно–технических разработок продавец, преследует вполне определенную цель, куда он намерен направить полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств, для продолжения своих научных исследований и разработок, одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

Для данной разработки сложно найти достаточно средств, чтобы создать отдельно предприятие, кроме того нельзя забывать о рисках. Разумнее всего показать данные разработки коммерческим компаниям по созданию микроэлектроники СВЧ-устройств и продолжить дальнейшие исследования.

Для коммерциализации объекта исследования и обоснования его целесообразности, был проработан следующий метод коммерциализации научной разработки: передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

5.7 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Производители СВЧ-устройств в электронике и метрологии	Разработанная модель полосно-пропускающего СВЧ фильтра на основе метаматериалов, которая может повысить параметры фильтра в ГГц диапазоне частот.
Производства, требующие метрологических измерений	Замена имеющихся фильтров на более современные устройства на основе метаматериалов, которые имеют более высокий КПД.

В таблице 6 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 6 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Создание модели полосно-пропускающего СВЧ фильтра на основе метаматериалов, которая может быть использована при проектировании устройств в метрологии и электронике.
Ожидаемые результаты проекта:	Построены графики параметров фильтра в ГГц диапазоне, разработана схема полосно-пропускного фильтра на основе метаматериалов, исследованы динамические характеристики.
Критерии приемки результата проекта:	Представленная модель должна отражать реальную работу СВЧ-фильтра.
Требования к результату проекта:	Требование:
	Повышение КПД устройства;
	Повышение параметров в ГГц диапазоне;

В таблице 7 представлена информация о рабочей группе, роли и функции каждого участки в трудовом проекте.

Таблица 7 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, календ/раб. дн.
1	Заревич А.И. Доцент, к.т.н. ИШИТР ТПУ	Руководитель проекта	Выдает задание на дипломный проект, оказывает помощь в разработке календарного плана работы на весь период дипломного проектирования, рекомендует необходимую литературу, справочные материалы, типовые проекты и другие источники по теме проекта, проводит предусмотренные консультации, проверяет выполнение работы	33/24
2	Аксёнова А.М. исполнитель проекта, магистрант	Исполнитель проекта	Сбор, обобщение и систематизация информации необходимой для разработки проектного предложения. Обзор	156/127

	ИШИТР ТПУ		разновидностей метаматериалов. Изучение систем использования технологии метаматериалов в полосно-пропускающих фильтров. Выбор модели полосно-пропускающего фильтра. Создание модели СВЧ-фильтра в программном комплексе AWR Microwave Office. Написание дипломного проекта, оформление иллюстративного материала.	
			ИТОГО:	189/151

5.8 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

5.8.1 Иерархическая структура работа проекта

Детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 41 представлен шаблон иерархической структуры работ.

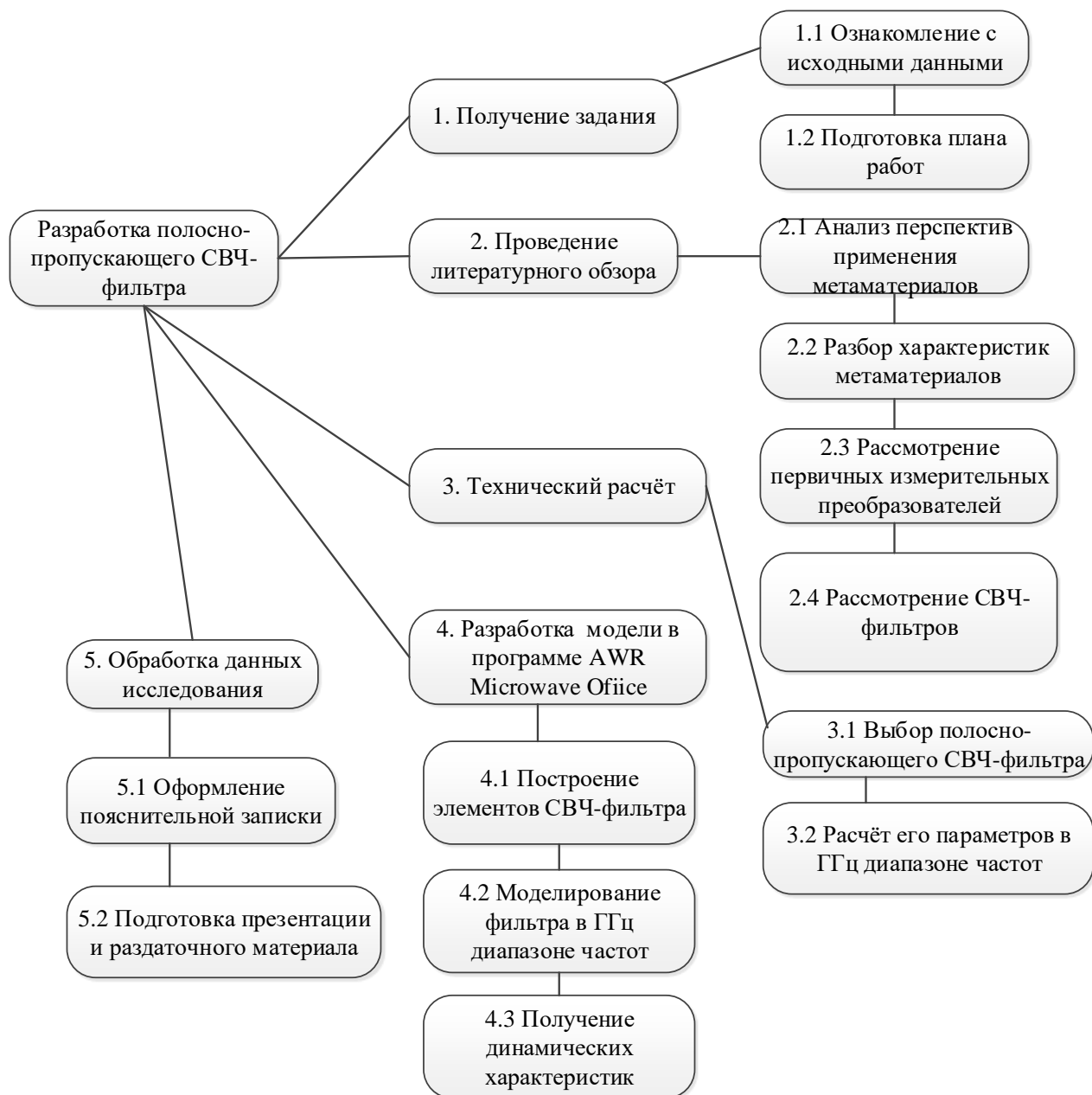


Рисунок 41 – Иерархическая структура работ по проекту

5.8.2 Контрольные события проекта

При организации проекта необходимо оптимально планировать сроки проведения работ. В таблице 8 определены ключевые события проекта их даты и результаты.

Таблица 8 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
-------	---------------------	------	-------------------------------------

1	Выбор направления исследований	20.10.2020	Отчёт
2	Разработка технического задания	16.01.2021	Бланк задания
3	Разработка календарного плана	20.01.2021	Календарный план-график
4	Теоретические исследования	25.02.2021	Литературный обзор
5	Практические исследования и разработки	20.04.2021	Графики, расчёты
6	Обобщение и оценка результатов	06.05.2021	Отчёт о результатах исследований
7	Оформление расчётно-пояснительной записки	20.05.2021	Расчётно-пояснительная записка

4.8.3 План проекта

Составление календарного плана-графика проекта включает в себя несколько аспектов. Должен быть спланирован срок длительности работ, определена их последовательность и взаимосвязь, подумать о необходимых ресурсах. В дальнейшем, когда проект перейдет на стадию исполнения, то есть практической реализации запланированных действий, именно по этому плану-графику отслеживается ход выполнения работ [26]. Результатом планирования работ является календарный план, представленный в виде таблицы 9.

Таблица 9 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение технического задания	2	16.01.21	17.01.21	Заревич А.И.
2	Разработка календарного плана	2	18.01.21	19.01.21	Заревич А.И. Аксёнова А.М.
3	Подбор и изучение литературных и патентных источников	15	20.01.21	03.02.21	Аксёнова А.М.
4	Постановка задач исследования	5	04.02.21	08.02.21	Заревич А.И. Аксёнова А.М.
5	Подготовка методической части	7	09.02.21	15.02.21	Аксёнова А.М.
6	Технический расчёт	9	16.02.21	24.02.21	Аксёнова А.М.
7	Выполнение моделирования в	28	25.02.21	25.03.21	Аксёнова А.М.

	AWR Microwave Office				
8	Анализ режимов работы	15	26.03.21	09.04.21	Заревич А.И. Аксёнова А.М.
9	Выбор оборудования	10	10.04.21	19.04.21	Аксёнова А.М.
10	Разработка технической документации	11	20.04.21	31.04.21	Аксёнова А.М.
11	Оценка экономической эффективности исследуемой технологии	12	01.04.21	12.05.21	Аксёнова А.М.
12	Рассмотрение вопросов социальной ответственности	6	13.05.21	18.05.21	Аксёнова А.М.
13	Оформление пояснительной записки	7	19.05.21	25.05.21	Аксёнова А.М.

Для предоставления календарного плана более наглядным образом, используем диаграмму Ганта (таблица 10). Диаграмма Ганта представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), которые используются для иллюстрации графика или плана работ, для различных проектов. Данные диаграммы используются в качестве одного из методов, при планировании проектов.

График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. Момент начала и завершения работы на диаграмме определяются концами полос, а протяженность характеризует длительность работы. Вертикальная ось отображает перечень поставленных задач. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой или цветом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. На данной диаграмме цветами приведены Аксёнова А.М. (зеленый), Заревич А.И. (синий).

Таблица 10 – Календарный план–график проведения НИОКР по теме

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т _к , календ. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1		■														
2	Разработка календарного плана	Руководитель, Инженер	1 2		■ ■														
3	Подбор и изучение литературных и патентных источников	Инженер	15			■	■												
4	Постановка задач исследования	Руководитель, Инженер	1 5				■ ■												
5	Подготовка методической части	Инженер	7					■											
6	Технический расчёт	Инженер	9						■										
7	Выполнение моделирования в AWR Microwave Office	Инженер	28							■	■	■							
8	Анализ режимов работы	Руководитель, Инженер	5 15										■	■					
9	Выбор оборудования	Инженер	10											■	■				
10	Разработка технической документации	Инженер	11												■	■			
11	Оценка экономической эффективности исследуемой технологии	Инженер	12													■	■		
12	Рассмотрение вопросов социальной ответственности	Инженер	6															■	
13	Оформление пояснительной записки	Инженер	7																■

5.9 Бюджет научного исследования

При составлении бюджета затрат на разработку проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям [27]:

- материальные затраты проекта;
- амортизация;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

5.9.1 Определение стоимости материальных затрат

Расчет стоимости материальных затрат включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

В данной научно исследовательской работе создавалась компьютерная иммитационная модель полосно-пропускающего фильтра на основе новой технологии применения метаматериалов, в связи с чем установить базовую стоимость затрат на создание данного фильтра не представляется возможным. Данная технология еще не применяется на производствах электроники, поэтому дальнейшие расчеты будут вестись начиная с пункта «амортизации» проекта.

5.9.2 Амортизация

Так как для работы над магистерской диссертацией используется компьютерная техника, посчитаем её амортизацию.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}$$

где $T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники (127 дней); $T_{кал}$ – календарное время (365 дней); $Ц_{кт}$ – цена компьютерной техники (60 000 руб.); $T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{ам} = \frac{127}{365} \cdot 60000 \cdot \frac{1}{5} = 4175 \text{ руб.}$$

Расчет амортизационных отчислений, на полное восстановление основных средств, производится по нормативам амортизации, утвержденном в установленном действующим законодательством порядке. Амортизация оборудования включается в стоимость затрат в таблице 13.

5.9.3 Полная заработная плата исполнителей

Включается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении данной работы. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата; $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–15% от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot F_{дн}$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника; $F_{дн}$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}}$$

где $Z_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня

M=11,2 месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 56 раб. дней M=10,4 месяца, 6-дневная неделя; $F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Научный руководитель имеет должность доцента и степень кандидата технических наук. Оклад на 2020 год составил 36 174 руб. Оклад инженера на 2020 год составил 18426 руб.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Районная доплата, руб.	Месячная зарплата, руб.	Среднедневная заработная плата, руб.	Кол-во раб. дн.	Основная заработная плата руб.
Руководитель	36 174	1,3	47 026	2 020	8	16 160
Инженер	18 426	1,3	23 953	1 213	127	154 051
ИТОГО:						170 211

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коеф. доплаты	Основная заработная плата руб.	Дополнительная заработная плата руб.	Полной заработной плата, руб.
Руководитель	0,15	16 160	2 424	18 584
Инженер	0,15	154 531	23 179	177 710
ИТОГО:			25 603	196 294

5.9.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{ЗП}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 28.11.2018 №446 – ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{ЗП} = 30\% \cdot 196\,294 = 58\,888 \text{ руб.}$$

5.9.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д.

$$Z_{накл} = k_{нр} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп})$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16% от суммы основной и дополнительной заработной платы.

$$Z_{накл} = (170\,211 + 25\,603) \cdot 0,16 = 31\,330 \text{ руб.}$$

5.9.6 Формирование сметы проекта

Для формирования бюджета затрат проекта опираемся на рассчитанную величину затрат проекта. При составлении договора с

заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку необходимой продукции.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ, которая сведена в таблицу 13.

Таблица 13 – Бюджет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
Затраты по основной заработной плате	170 211	58,19
Затраты по дополнительной заработной плате	25 603	8,75
Отчисления во внебюджетные фонды	58 888	20,13
Оплата услуг сторонних организаций (интернет)	2261	0,77
Накладные расходы	31 330	10,72
Амортизация оборудования	4175	1,43
Бюджет затрат ТП	292 468	100

5.10 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Целью научно-исследовательской работы было создание модели полосно-пропускающего СВЧ фильтра в программном комплексе AWR Microwave Office, в связи с чем возникает трудность с определением финансовой эффективности, так как нет возможности определить стоимость затрат на создание устройства. Таким образом в данной главе будет рассмотрена только ресурсоэффективность проекта.

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент разработки; b_i – банальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Данные для определения ресурсоэффективности проекта были взяты из таблицы 2.

Таблица 14 – Критерии ресурсоэффективности и их характеристики

Критерии	Весовой коэффициент	Оценка разработки метаматериала	Оценка аналога «Микран»
1. Помехоустойчивость	0,2	4	3
2. КПД	0,25	5	3
3. Надежность	0,15	2	4
4. Энергоэкономичность	0,15	3	4
5. Функциональность	0,25	5	3
Итого:	1,00	4,05	3,3

Далее рассчитываем интегральный показатель эффективности разработки и аналога. Учитывая отсутствие интегрального финансового показателя у разработки и аналога, то данный параметр берем равной 1.

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,05}{1} = 4,05$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{3,3}{1} = 3,3$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{4,05}{3,3} = 1,227$$

где \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта; $I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки; $I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Отразим сравнительную эффективность разработки в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка проекта	Аналог «Микран»
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,05	3,3
3	Интегральный показатель эффективности	4,05	3,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,227	1

5.11 Заключение по разделу «Финансовый менеджмент»

В ходе выполнения данного раздела магистерской диссертации был произведён анализ проекта со стороны финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Был произведён анализ потенциальных потребителей исследования на рынке и анализ конкурентных решений, с целью выявления конкурентоспособности. Был произведён SWOT анализ с целью выяснить потенциальные возможности исследования на рынке и определить его целесообразность. На их основе была оценена готовность проекта к коммерциализации и были выбраны подходящие для этого методы. Далее была разработана иерархическая структура проекта и был составлен календарный план работ, на основе которого была построена диаграмма Ганта, исходя из которой было выяснено, какой состав работ будет у проекта, их длительность и исполнители. Исходя из этого были оценены затраты на проект, после чего была оценена его общая ресурсоэффективность, с помощью интегрального показателя эффективности.

На проведение работ затрачено 292 468 руб. Работы были проведены за 127 рабочих дней бригадой из двух человек. Однако, детальная оценка экономической эффективности, выходит за пределы данного исследования и нуждается в дальнейшей проработке.

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основные правовые гарантии в части обеспечения производственной безопасности регламентирует Трудовой кодекс Российской Федерации [28]. Данный кодекс устанавливает права и обязанности работника и работодателя, регулирует вопросы охраны труда, профессиональной подготовки и повышения квалификации, трудоустройства, социального партнерства. Закрепляет правила оплаты и нормирования труда, порядок разрешения трудовых споров. В перечень основных законодательных актов о труде также входят Федеральные законы №125 и №426 [29-30].

Находясь на своем рабочем месте, т.е. в производственной среде, человек может подвергаться действию целого ряда опасных и (или) вредных производственных факторов, от действия которых он должен быть максимально защищен. В соответствии с ГОСТ 12.2.061-81 рабочее оборудование, инструмент, приспособления должно полностью отвечать требованиям безопасности, окружающая производственная среда соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям и, кроме того, рабочее место должно быть организовано таким образом, чтобы человек при выполнении работы затрачивал минимальное количество энергии [31].

Работа в аудитории относится ко второй категории тяжести труда – работы выполняются при оптимальных условиях внешней производственной среды и при оптимальной величине физической, умственной и нервно-эмоциональной нагрузки.

Схемы размещения рабочих мест с персональными компьютерами должны учитывать расстояния между рабочими столами с мониторами. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 расстояние между боковыми поверхностями мониторов должно составлять не менее 1,2 м, а расстояние между экраном

монитора и тыльной частью другого монитора быть не менее 2,0 м. Рабочие места с ПК по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, желательно слева [32].

Особое внимание стоит обратить к ГОСТ 12.2.032-78, который определяет общие эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ сидя [33].

Для того, чтобы достичь максимальной работоспособности на рабочем месте, необходимо произвести правильную компоновку рабочей зоны. Высота рабочего места, при работе сидя, должно составлять 420 мм, пространство для ног при этом должно составлять не менее 500 мм. Расположение органов управления на рабочем месте должно соответствовать рисунку 42.

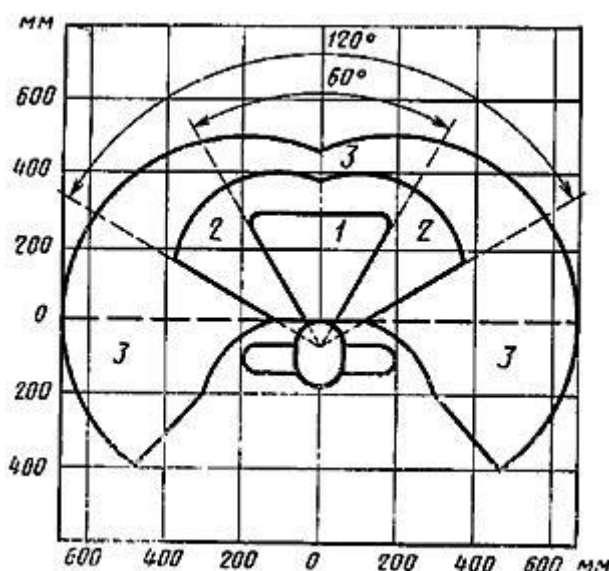


Рисунок 42 – Зоны для оптимального управления ручных операций [33]

где 1 – зона для размещения наиболее важных и очень часто используемых органов управления; 2 – зона для размещения часто используемых органов управления; 3 – зона для размещения редко используемых органов управления

Согласно ГОСТ Р 50923-96 рабочий стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики и позволяющей удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с

учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. При отсутствии регулировки высота стола должна быть в пределах от 680 до 800 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Глубина рабочей поверхности стола должна составлять 800 мм (допускаемая не менее 600 мм), ширина – соответственно 1 600 мм и 1 200 мм. Рабочая поверхность стола не должна иметь острых углов и краев, иметь матовую или полуматовую фактуру [34].

Согласно [35], к рабочему месту предъявляются требования, указанные таблице 16.

Таблица 16 – Требования к рабочему месту в офисном помещении

Наименование работы	Высота рабочей поверхности при организации рабочего места, мм		Высота сиденья, мм	
	для женщин	для мужчин	для женщин	для мужчин
Работа с компьютером	630	680	400	430

Клавиатура должна располагаться на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю. Требования к клавиатуре, согласно [36], представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Требования к клавиатуре

Наименование	Нормативные требования
Высота основного ряда клавиатуры	30-35 мм
Наклон клавиатуры	0°-12°
Профиль клавиатуры	Профиль может быть вогнутый, наклонный, рельефный, ступенчатый или плоский.
Величина хода клавиш	1,5-6 мм
Дребезжание клавиш	Исключается повтор активации клавиши

Для обеспечения физиологически рациональной рабочей позы, создания условий для ее изменения в течение рабочего дня применяются подъемно-поворотные рабочие стулья с сиденьем и спинкой, регулируемые по высоте и углам наклона, а также расстоянию спинки от переднего края сидения.

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 град. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

В анализируемом помещении в соответствии с нормами СанПиН 1.2.3685-21 режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности [32].

6.2 Производственная безопасность

Для моделирования электроэнергетических систем сегодня используются компьютерные технологии. Производственные факторы, связанные с работой на компьютере: шум, недостаточная освещенность, поражение электрическим током и др. Сильное умственное напряжение оказывает негативное влияние на процесс и результаты проектирования и решения задач.

При воздействии вредных факторов у человека будут наблюдаться болезненные ощущения в спине, пояснице, шее, головные боли, сухость и покраснение глаз, усталость, раздражительность.

Перечень вредных и опасных факторов, характерных для рассматриваемой аудитории, приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Вредные и опасные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 [37]
2. Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 [38] СН 2.2.4/ 2.1.8.562-96 [39]
3. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	+	+	СНиП 23-05-95* [40] СанПиН 1.2.3685-21 [41]
4. Ионизирующее и электромагнитное излучение	+	+	+	СанПиН 1.2.3685-21 [41]
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	Правила устройства электроустановок [42] ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ [43] ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [44]

6.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Отклонение показателей микроклимата

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах [37].

Мероприятия по поддержанию оптимального санитарного состояния и микроклимата в рассматриваемой аудитории с ПК включают:

- применение вентиляции;
- уменьшение тепловыделений от мониторов ПК;

- использование специальных увлажнителей, комнатных растений;
- влажную ежедневную уборку помещений.

Для создания оптимальных микроклиматических условий наиболее целесообразно уменьшить тепловыделения от самого источника - дисплея и блока питания ПК. Это достигается обеспечением соответствующей площади и объема производственного помещения и устройством эффективных систем вентиляции и кондиционирования.

Кондиционирование воздуха обеспечивает автоматическое поддержание параметров микроклимата в необходимых пределах в течение всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ, создание небольшого избыточного давления в чистых помещениях для исключения поступления неочищенного воздуха. В помещениях с избытком тепла необходимо предусматривать регулирование подачи теплоносителя для соблюдения нормативных параметров микроклимата.

Воздух, поступающий в помещение с ПК должен быть очищен от загрязнений, в том числе от пыли и микроорганизмов.

Согласно [37], в рассматриваемой аудитории величины допустимых параметров микроклимата должны соответствовать значениям, указанным в таблице 19.

Таблица 19 – Допустимые параметры микроклимата

Категория работ	Период года	Параметр микроклимата	Величина
Ia	Холодный	Температура воздуха в помещении (диапазон ниже/выше оптимальных величин)	20,0-25,0 °С
		Температура поверхностей	19,0-26,0 °С
		Относительная влажность	15-75 %
		Скорость движения воздуха	0,1 м/с
Ia	Теплый	Температура воздуха в помещении (диапазон ниже/выше оптимальных величин)	21,0-28,0 °С
		Температура поверхностей	20,0-29,0 °С
		Относительная влажность	15-75 %
		Скорость движения воздуха	0,1-0,2 м/с

Для создания допустимых параметров микроклимата необходимо провести расчет воздухообмена для очистки воздуха в аудитории 208б. В жилых и общественных помещениях постоянным вредным выделением является выдыхаемый людьми углекислый газ (CO₂). Определение необходимого воздухообмена производится по количеству углекислого газа, выделяемого человеком и по его допустимой концентрации.

Количество углекислого газа в зависимости от возраста человека и выполняемой работы приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Количество углекислоты, выделяемой человеком при разной работе

Возраст человека и характер работы	Количество CO ₂	
	в л/ч	в г/ч
Взрослые:	-	-
При физической работе	45	68
При легкой работе	23	35
В состоянии покоя	23	35
Дети до 12 лет	12	18

Превышение уровня шума

Действие шума различно: затрудняет разборчивость речи, вызывает снижение работоспособности, повышает утомляемость, вызывает необратимые изменения в органах слуха человека.

В таблице 21 приведены уровни основных источников шумов, находящихся в аудитории 208б.

Таблица 21 – Уровни звукового давления различных источников

Источник шума	Уровень шума, дБА
Жесткий диск	40
Вентилятор	45
Клавиатура	10
Принтер	45
Сканер	42

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [38] на рабочем месте при работе с ПК шум не должен превышать 80 дБА.

Для снижения шума можно прибегнуть к рациональной планировке помещения, шумоизоляции [39]. В рассматриваемой аудитории шум снижается благодаря рациональной планировке.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Комфортные условия труда во многом зависят от освещения, в котором работает человек. Рациональное освещение повышает безопасность работ и производительность труда. Несоответствие нормативным показателям освещения или неправильная установка источников света могут быть причиной быстрой утомляемости работающих, а также несчастного случая.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

В аудитории 208б применяется комбинированное освещение. Для выполнения норм СНиП 23-05-95* [39] в аудитории установлены люминесцентные лампы ЛБ.

Таблица 22 – Характеристики люминесцентной лампы ЛБ

Мощность, Вт	Напряжение в сети, В	Световой поток, лм
15	127	835
20	127	1060
30	220	2020
40	220	2800
65	220	4600
80	220	5200
125	220	-

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента

светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Аудитория 208б имеет следующие размеры: длина $A = 7$ м, ширина $B = 7$ м, высота $H = 3,5$ м. Высота рабочей поверхности $h_{pn} = 0,8$ м. Коэффициент отражения стен $R_c = 30$ %, потолка $R_n = 50$ %. Коэффициент запаса $k = 1,5$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильники типа ЛБ, $\lambda = 1,4$.

Приняв $h_c = 0,5$ м, определяем расчетную высоту:

$$h = H - h_c - h_{pn} = 3.5 - 0.5 - 0.8 = 2.2 \text{ м}$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1.2 \cdot 2.2 = 2.64 \text{ м}$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L / 3 = 0.88 \text{ м}$$

Определяем количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(7 - \frac{2}{3} \cdot 2.64)}{2.64} + 1 \approx 3$$

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0.5} = \frac{(7 - \frac{2}{3} \cdot 2.64)}{1 + 0.5} \approx 4$$

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильника типа ЛБ мощностью 40 Вт (с длиной 1 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 40 см. Изображаем размещения на нем светильников (рисунок 43). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 24$.

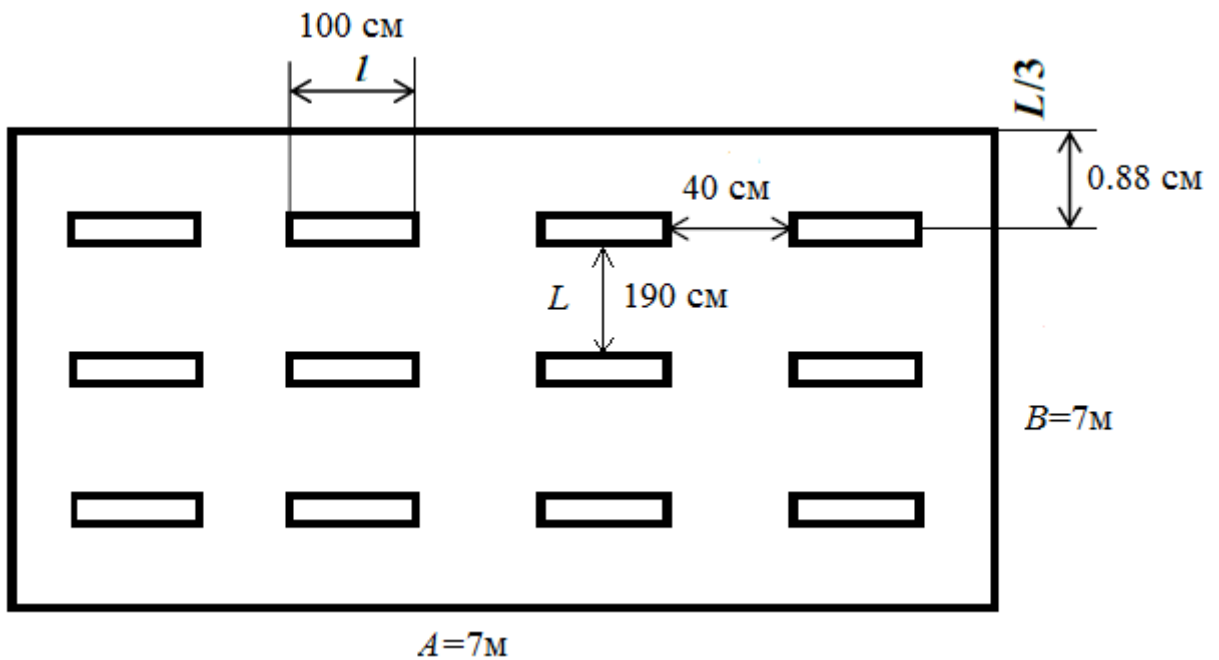


Рисунок 43 – План размещения светильников с люминесцентными лампами
ЛБ в аудитории 2086

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{49}{2.2 \cdot (7 + 7)} = 1.59$$

Определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0.61$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N_l \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 49 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{24 \cdot 0.61} = 1579 \text{ лм}$$

По таблице 9 выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ 30 Вт с потоком 2020 лм.

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 24 \cdot 30 = 720 \text{ Вт}$$

Ионизирующее и электромагнитное излучение

Большинство технических приборов излучают электромагнитную энергию во внешнюю среду, воздействуя на человека. Если у электромагнитного поля напряженность выше предельно допустимой величины, то у человека начнут развиваться нарушения сердечно-сосудистой и нервной систем.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг монитора должна быть не более [32]:

- 25 В/м в диапазоне низких частот (5 Гц – 2 кГц);
- 2,5 В/м в диапазоне высоких частот (2 кГц – 400 кГц).

Мониторы персональных компьютеров являются источниками электростатического поля, поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500 В.

Из-за ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение функций кроветворных органов (нарушается свертываемость крови, сосуды становятся более хрупкими), повышается риск инфекционных заболеваний.

В рассматриваемой аудитории используются современные мониторы, которые имеют стандарт низкого излучения. Максимальное сокращение времени пребывания в зоне действия электромагнитного излучения является еще одним из наиболее эффективных способов защиты организма от негативного воздействия электромагнитного излучения.

Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Аудитория 208б согласно ПУЭ [42] относится к помещениям без повышенной опасности, т.к. отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

Основной опасностью поражения электрическим током могут выступать поврежденные шнуры питания ПК.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы: защитное заземление; зануление; выравнивание потенциалов; систему защитных проводов; защитное отключение; изоляция нетоковедущих частей. Основной мерой защиты от поражения электрическим током является заземляющее устройство.

Заземляющее устройство – это совокупность заземлителя (металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей) и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем (рисунок 44).

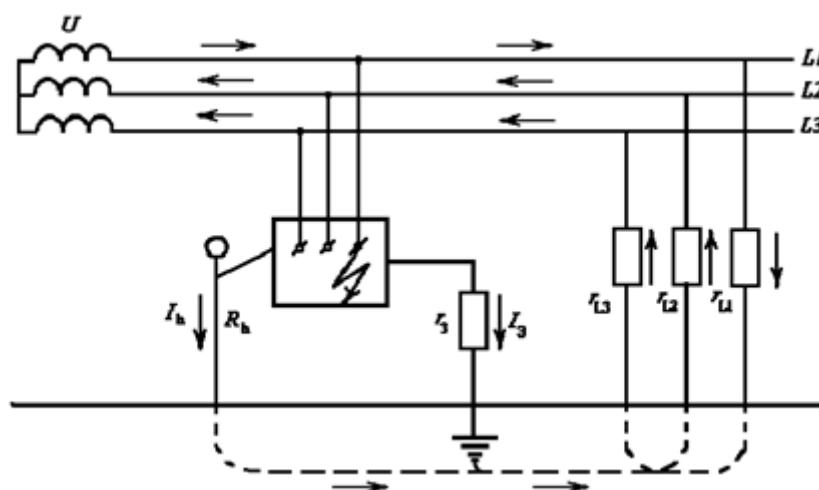


Рисунок 44 – Схема включения человека в сеть для случая прикосновения к заземленной электроустановке

6.3 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность на предприятии – это определенный комплекс мер. Их цель – приведение его деятельности к соответствию природоохранным нормативам и повышение его рентабельности. Организация, использующая ресурсосберегающие процессы, увеличивает

свою эффективность, а кроме того, снижает воздействие вредных веществ, как на самих работников, так и на окружающую среду.

При рассмотрении аудитории 208б 10-го корпуса НИ ТПУ стоит обратить внимание на светильники с люминесцентными ртутными лампами ЛБ 30 Вт в количестве 24 штук. Вышедшие из строя ртутные лампы могут нанести серьёзный вред окружающей среде в общем и атмосфере, гидросфере и литосфере в частности, в случае, если будут выброшены вместе с остальными отходами. Поэтому необходимо сортировать мусор и сдавать вредные отходы на утилизацию.

Также при работе с ноутбуками вышедшая из строя аккумуляторная батарея, выброшенная вместе с обычным бытовым мусором, может нанести вредное воздействие на окружающую среду.

В анализируемой аудитории работа производится в основном на ПК, которые обладают компонентами, представляющими опасность не только для человека, но и для окружающей среды. К таким веществам относятся:

- свинец, который накапливаясь в организме поражает нервную систему, приводит к почечной недостаточности;
- ртуть, поражающая мозг и нервную систему;
- никель и цинк, которые могут вызывать дерматит;
- щелочи, прожигающие слизистую оболочку и кожу.

В СанПиН 1.2.3685-21, даются следующие общие рекомендации по снижению опасности для окружающей среды, исходящей от компьютерной техники: применять оборудование, соответствующее санитарным нормам и стандартам экологической безопасности, применять расходные материалы с высоким коэффициентом использования и возможностью их полной или частичной регенерации, отходы в виде компьютерного лома утилизировать, использовать экономные режимы работы оборудования [32].

Также компьютер требует специальных утилизационных мероприятий. К таким мероприятиям относятся:

- отделение металлических частей от неметаллических;

- металлические части переплавляются для дальнейшего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специальной переработки;
- батарея и зарядное устройство компьютера так же нужно отдать на утилизацию [45].

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Приведем анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований. Чрезвычайные ситуации можно разделить на: техногенные, природные, социально-политические. Также существуют локальные, региональные, национальные, глобальные чрезвычайные ситуации.

К техногенным можно отнести: пожар, обрушение зданий, аварии в электроэнергетических системах.

К природным можно отнести: землетрясение, метеорологические явления, природные пожары, эпидемия заболеваний.

Среди всех перечисленных для анализируемой аудитории наиболее вероятно появление пожара. Основной причиной пожара в 208б аудитории является неисправность электрооборудования, короткое замыкание, нагрев проводов и загорание изоляции, перезагрузка электрических сетей электропроводки.

В связи с этим необходимо проводить пожарную профилактику, представляющую собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничения его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях

обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники. Для рассматриваемой аудитории план эвакуации приведен на рисунке 45.

Горючими компонентами являются: строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей и др. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами.

Источниками зажигания могут служить электрические приборы, применяемые для технического обслуживания, устройства электропитания, кондиционирования воздуха, где в результате различных нарушений образуются перегретые элементы, электрические искры и дуги, способные вызвать загорания горючих материалов.

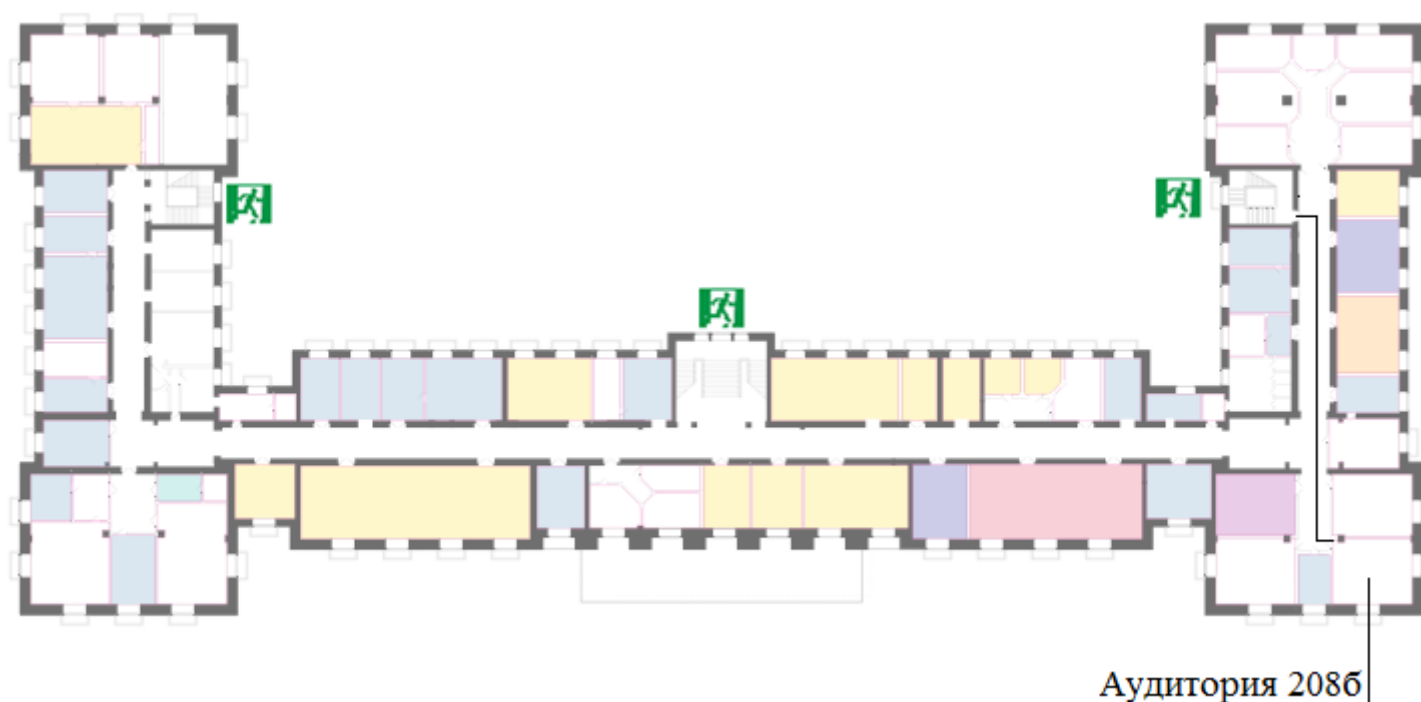


Рисунок 45 – План эвакуации 2-го этажа 10-го корпуса НИ ТПУ

Рабочее помещение имеет категорию пожарной опасности В, так как имеются твёрдые горючие и трудногорючие вещества и материалы [46].

Для предотвращения распространения огня во время пожара с одной части здания на другую, устраивают противопожарные преграды в виде стен, перегородок, дверей, окон.

В коридорах, на лестничных площадках и у входов, должны быть установлены пожарные краны. В помещении должны быть первичные средства огнетушения: ящик с сухим песком, огнетушители.

При возгорании или возникновении пожара следует немедленно начать эвакуацию людей, отключить подачу воздуха по системе вентиляции, обесточить помещение и вызвать пожарную охрану. При эвакуации, следует не создавать паники и двигаться в соответствии с планом эвакуации.

В соответствии с нормами, указанными в ГОСТ 12.1.004-91, для ликвидации пожаров в начальной стадии применяются первичные средства пожаротушения: пожарные краны; углекислотные огнетушители (ручные ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8; передвижные-ОУ-25, ОУ-80); порошковые огнетушители типа ОП-5-01 [47].

«При защите помещений с вычислительной техникой следует учитывать специфику взаимодействия огнетушащих веществ с защищаемым оборудованием, изделиями и материалами. Указанное помещение следует оборудовать углекислотными огнетушителями» [48].

Наиболее целесообразно применение ручных углекислотных огнетушителей типа ОУ-2, ОУ-3, ОУ-5.

К организационным мерам относятся мероприятие режимного характера, обучение и разработке планов эвакуации людей в случае пожара. К техническим мерам относятся современные автоматические средства сигнализации, методы и устройства ограничения распространения огня, автоматические стационарные системы тушения пожаров, первичные средства пожаротушения.

6.5 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

В разделе «Социальная ответственность» была рассмотрена 208б аудитория 10 корпуса НИ ТПУ на предмет возникновения вредных (отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, недостаточная освещенность рабочей зоны) и опасных (повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека) факторов.

В первом пункте данного раздела были рассмотрены организационные и правовые вопросы обеспечения безопасности труда человека при выполнении работ. Так как выполнение выпускной квалификационной работы сопряжено с работой за компьютером, то эргономика рабочей зоны была выполнена в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 и ГОСТ Р 50923-96.

Далее были определены вредные и опасные факторы для рассматриваемой аудитории, их нормирование и меры по их ограничению.

В пункте «Экологическая безопасность» были рассмотрены отходы, образующиеся при эксплуатации данной аудитории, а также меры по их ограничению на окружающую среду.

В последнем пункте данного раздела был проведен краткий анализ возможных чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть в рассматриваемой аудитории. Наиболее вероятной ЧС в анализируемой аудитории является появление пожара.

Для обеспечения нормальной работы и своевременной эвакуации людей при пожаре необходимо оборудовать помещения подсвеченными табличками с надписью «выход», аварийным освещением, и медицинскими аптечками. Для рассматриваемой аудитории был составлен план эвакуации.

Таким образом, при работе с персональными компьютерами в анализируемой аудитории выполняются все требования, установленные в нормативных документах [28-48].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной ВКР была изучена информация и проведен литературный обзор о метаматериалах, их классификации и особенностях электродинамических свойств.

Проанализировано использование структур на основе метаматериалов в области метрологии, а именно в первичных измерительных преобразователях. Рассмотрены принцип работы первичных измерительных преобразователей, их классификация, и выделены полосно-заграждающие и полосно-пропускающие сверхвысокочастотные фильтры, для дальнейшего проектирования и создания модели в программном комплексе AWR Microwave Office. Далее был выполнен анализ схем моделей и получены сравнительные характеристики зависимости коэффициента отражения и коэффициента передачи от частоты СВЧ фильтров.

В последней главе был произведен сравнительный анализ СВЧ характеристик полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров с грибовидной полосно-заграждающей структурой и полосно-пропускающей структурой Н-волновода на основе метаматериалов. Рассматривались преимущества и недостатки серийных СВЧ фильтров, используемых в первичных измерительных преобразователях, а также достоинства и недостатки технологии полосных фильтров на основе метаматериалов.

В разделе «Социальная ответственность» была рассмотрена 2086 аудитория 10 корпуса НИ ТПУ на предмет возникновения вредных (отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, недостаточная освещенность рабочей зоны) и опасных (повышенное значение напряжения в электрической цепи) факторов.

В разделе «Финансовый менеджмент» был произведен анализ проекта со стороны финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. На проведение работ затрачено 346 733 руб. Работы были проведены за 127 рабочих дней бригадой из двух человек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шараевский Ю. П. «Левые» среды. Чем они интересны? //Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 20. – №. 1.
2. Авдюшин А. С., Власов М. Ю., Пастернак Ю. Г. Применение метаматериалов в антенной технике // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – №. 3-1.
3. Земляков В. В., Заргано Г. Ф. Одно-и многомодовые селективные СВЧ-устройства на волноводах сложного сечения и перспективы их развития в структурах многослойных интегральных микросхем // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2016. – №. 5 (178).
4. Кухаренко А. С., Елизаров А. А. Анализ физических особенностей метаматериалов и частотно-селективных СВЧ-устройств на их основе //Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – №. 5.
5. Гусинский А. В. и др. Разработка и метрологическое обеспечение измерительной аппаратуры в миллиметровом диапазоне длин волн //Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2004. – №. 2 (6).
6. Шарапов, В. М., Полищук, Е. С., Кошевой, Н. Д., Ишанин, Г. Г., Минаев, И. Г., & Совлуков, А. С. (2012). ББК 32.96 04 Д21.
7. Чередов А. И., Щелканов А. В. Первичные измерительные преобразователи. – 2010.
8. Храмов А.В. Первичные измерительные преобразователи измерительных приборов и автоматических систем. – Киев, 1988. – 527 с.
9. Данилин А. А. Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2008. – 184 с.
10. Sievenpiper D. et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band //IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques. – 1999. – Т. 47. – №. 11. – С. 2059-2074.

11. Бойко С. Н. и др. Исследование малогабаритного развязывающего СВЧ фильтра на метаматериале // Материалы международной научно-технической конференции АПЭП-2014. – 2014. – Т. 1. – С. 218-225.
12. Capolino F. (ed.). Metamaterials handbook. – CRC Press, 2009.
13. Engheta N., Ziolkowski R. W. (ed.). Metamaterials: physics and engineering explorations. – John Wiley & Sons, 2006.
14. Заргано Г.Ф., Земляков В.В. Электродинамический анализ и синтез селективных устройств на волноводах сложного сечения для современных антенно-фидерных систем // Антенны. – 2011. – Вып. 7 (170). – С. 64-73.
15. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Гадзиева А.А., Крутиев С.В. Электродинамический анализ и синтез компактных фильтров на L-гребневых волноводах // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/3. – С. 48-50.
16. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Пелецкий Р.В. Синтез направленных ответвителей на П-волноводах, связанных системой круглых отверстий // Радиотехника и электроника. – 2011. – № 7. – С. 789-795.
17. Metamaterials Handbook: Vol. I. Phenomena and Theory of Metamaterials, 926 p. Vol. II. Applications of Metamaterials, 724 p. / Ed. by F. Capolino CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.
18. Вендик И.Б. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3-28.
19. Бойко С. Н. и др. Исследование малогабаритного развязывающего СВЧ фильтра на метаматериале // Материалы международной научно-технической конференции АПЭП-2014. – 2014. – Т. 1. – С. 218-225.
20. Официальный сайт компании Applied Wave Research [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.awrcorp.com/ru>

21. Ривас-Торрес У. Эффективное использование S-параметров. Эмулирование поведения электронных компонентов на определенных частотах // Компоненты и технологии. – 2006. – №. 10. – С. 164-167.
22. Нефедов, В. И., Сигов, А. С., Битюков, В. К., & Хахин, В. И. (2006). Метрология и радиоизмерения. Высш. шк.
23. Беляков А. Ю. и др. Расчет СВЧ полосовых фильтров с частотными характеристиками специального вида // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2015. – №. 8 (91).
24. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
25. Лютиков, И. В., Фомин, А. Н., Леусенко, В. А., Викторов, Д. С., Филонов, А. А., Лященко, Л. И., & Копылов, В. А. (2016). Метрология и радиоизмерения.
26. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
27. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
28. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
29. Федеральный закон от 24 июля 1998 г. N 125-ФЗ "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.
30. Федеральный закон N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013.
31. ГОСТ 12.2.061-81 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».
32. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

33. ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».

34. ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

35. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

36. ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDТ). Часть 4. Требования к клавиатуре.

37. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

38. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

39. СН 2.2.4/ 2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.

40. СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение.

41. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

42. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2001. – 928 с.

43. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

44. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

45. ГОСТ Р 53691-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I-IV класса опасности. Основные требования.

46. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1).

47. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.

48. ППР РФ (Правила противопожарного режима в Российской Федерации).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

1 Metamaterials

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ91	Аксёнова Анна Магомедовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Заревич Антон Иванович	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Маркова Наталия Александровна			

Abstract

The final qualifying work consists of x pages, x figures, x tables, x used sources.

Key words: metamaterials, primary transducer, band-stop filter, band-pass filter, reflection coefficient, ultrahigh frequencies.

The object of the research is the use of metamaterials in primary transducers.

The purpose of this work is developing a band-stop and a band-pass filters of the primary transducer of ultrahigh frequency with comparative characteristics of the designs of frequency-selective microwave devices made on the basis of metamaterials.

To achieve this purpose, the following tasks were completed:

1. Conducting a research of scientific articles about creation of metamaterials.
2. Researching of the use of primary transducers in metrology and the use of band-stop and band-pass filters in microwave technology.
3. Designing a computer model of a band-stop and band-pass ultrahigh frequency filters in AWR Microwave Office v.9.0 software package. Researching analogs of structures based on metamaterials.
4. Performing a comparative analysis of the designed models of filters with a mushroom band-blocking structure and a band-pass structure of an H-waveguide based on metamaterials.

1 Metamaterials

One of priority directions in science today is the creation of artificial materials with unusual properties that are not observed in natural materials. These substances are called metamaterials [1].

Metamaterial is an artificially formed and specially structured medium with electromagnetic properties that are difficult to achieve technologically or not found in the nature. The altered periodic structure modifies the dielectric and magnetic permeability of the starting material. The developer of metamaterials has the ability to select various free parameters (dimensions of structures, shape, constant and variable lattice periods of the elements that form the structure).

One of the possible properties of metamaterials is a negative refractive index n , which manifests itself when the dielectric and magnetic permeabilities of the material are simultaneously negative.

The optical properties of a substance are characterized by the refractive index n , which is related to ε , μ by a simple relationship [1]:

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \quad (3.5)$$

For vacuum $\varepsilon = \mu = 1$, and for other substances found in nature, $\varepsilon, \mu > 0$. For all known materials, the square root must be preceded by a "+" sign and therefore the refractive index is positive. If we do not take into account the losses in the medium and assume that ε and μ are real quantities, then it can be seen from relation (1.1) that the simultaneous change of signs ε and μ does not change the physical meaning of the expression.

Given this fact, the following assumptions can be made:

1. the properties of substances do not really depend on the simultaneous change of signs ε and μ ;
2. the simultaneous change of signs contradicts the basic laws of nature and there should not be such substances in nature;

3. substances with $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ have the right to exist and they must have some special properties.

Such substances were named by a Soviet scientist V.G. Veselago in 1967 as "left-handed". In his researches, the scientist V.G. Veselago described many unusual properties of "left-handed" substances, in particular, showed that such substances must have a negative refractive index, that is, for "left-handed" media, one must take the "-" sign. In addition, he suggested that it is necessary to search for "left-handed" substances among anisotropic gyrotropic media.

Anisotropic media are those whose properties depend on direction (crystals, ferromagnetic materials, etc.). If the anisotropy is caused by the application of an external action (for example, mechanical, application of electric and magnetic fields), then such media are called gyrotropic [2].

Let us consider the types of metamaterials and their structure in more detail.

Analysis of publications on various aspects of metamaterial technologies makes it possible to classify the whole variety of natural and artificial media depending on the effective values of their dielectric (ε) and magnetic (μ) permeabilities (Figure 1).

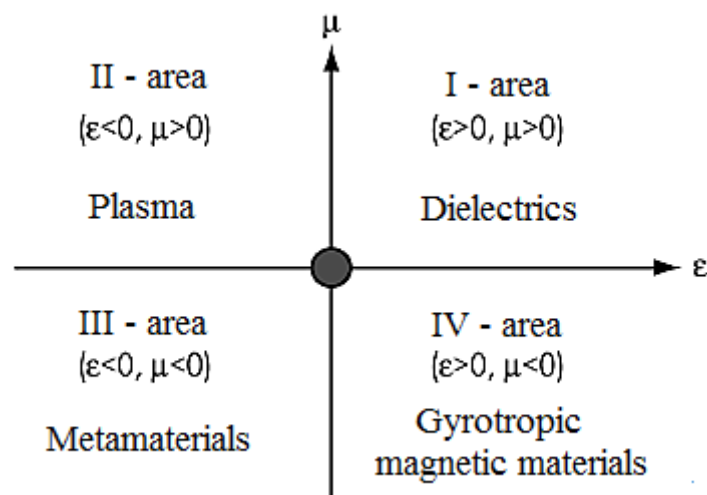


Figure 1 – Diagram $\varepsilon - \mu$ [2]

As described earlier, almost all naturally occurring substances have dielectric and magnetic permeability. As a rule, the overwhelming wide spectrum of frequency use in the field of microelectronics and metrology has these parameters, as a rule. Let us look at each of the areas of the diagram in more detail.

I – area

In foreign literature, these materials are usually called "double positive", thereby emphasizing the positive values of both ϵ and μ . Media of area I are considered transparent for electromagnetic waves if internal losses in them are small. Area I has the most of isotropic dielectrics.

II – area

The most famous example of a natural medium of the II area, which can be either transparent or opaque for electromagnetic waves, depending on the excitation frequency, is plasma, the dielectric constant of which in the absence of an external magnetic field is determined according to the formula [2]:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (3.6)$$

where ω_p is a parameter called the radial plasma frequency.

The plasma frequency depends on the density, the amount of charge, and the mass of charge carriers. Below the plasma frequency, the dielectric constant is negative, and electromagnetic waves cannot propagate due to the loss of transparency by the medium. At $\omega > \omega_p$ magnitude $\epsilon > 0$, and electromagnetic waves can pass through the ionized medium. A well-known example of an electromagnetic plasma is the earth's ionosphere, from which low-frequency radiation is reflected (at $\epsilon(\omega) < 0$), and high-frequency electromagnetic waves pass with little absorption [2].

Figure 2 shows an example of an area II metamaterial representing a system of thin parallel metallic conductors.

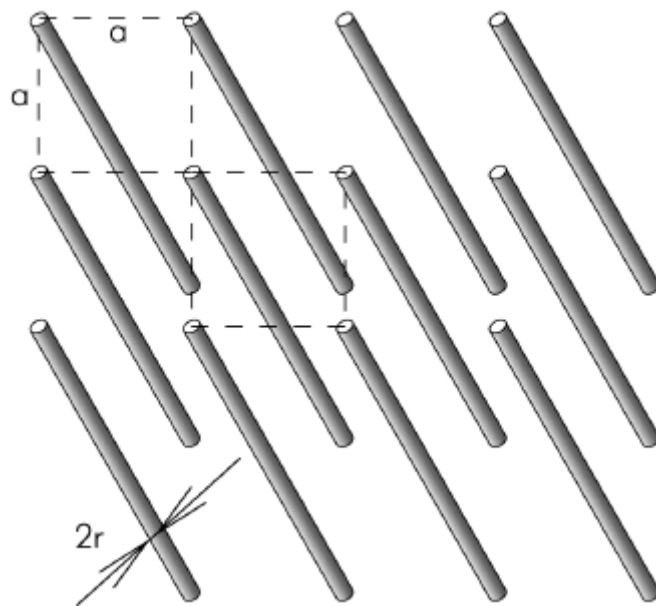


Figure 2 – Metamaterial of area II in the form of a set of thin metal conductors immersed in a supporting dielectric [2]

IV – area

Media with positive dielectric and negative magnetic permeability are, in certain frequency modes, some gyrotropic substances. The simplest element that makes it possible to create an artificial environment of area IV is an open-loop ring resonator, shown in Figure 3.



Figure 3 – Ring open resonator [2]

In this structure, the capacitance between the two rings is compensated by their inductance. A time-varying magnetic field with an intensity vector

perpendicular to the surface of the rings induces fluxes that, depending on the resonant properties of the structure, generate a secondary magnetic field that enhances the original or opposes it, which leads to positive or negative effective values μ . The magnetic permeability of a metamaterial created using such structures is described by the formula [4]:

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F \cdot \omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i \cdot \omega \cdot \zeta} \quad (3.7)$$

where ω_{0m} is the resonant frequency of the ring resonator, ζ is the damping parameter.

As can be seen from formula (1.3), at frequencies above the resonant frequency, the effective magnetic permeability of such a metamaterial is negative [4].

III – area

Substances that $\varepsilon, \mu < 0$ are referred to as area III of the diagram shown in Figure 1. Such substances include, for example, pure ferromagnetic metals and semiconductors. In them, when a certain type of wave propagates along the direction of an applied external magnetic field, the effective electric and magnetic permeabilities can simultaneously take on negative values [3].

The use of these structures to obtain metamaterials with negative effective values of the dielectric and magnetic components was first proposed by John Pendry in 1999 [2].

His approach was that if a composite material consists of discrete scattering elements, the size of which is smaller than the radiation wavelength, then this composite from the point of view of electrodynamics can be considered as continuous in a limited frequency band. In other words, a physical medium will be continuous in the electromagnetic sense if its properties can be described by averaged parameters varying on a scale much larger than the size and spacing of the components forming the material.

Thus, for the first time, a material was obtained that possesses simultaneously negative permittivities and permeabilities (material of area III). Until recently, this class of materials was represented only by artificial structures, but in 2006 it was found that crystals $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ have the same properties in the 150 GHz range.

Area III materials have a number of interesting properties, the most notable of which is the negative refractive index n of electromagnetic waves n . The results of direct measurement of the angle of refraction for a prism made on the basis of the metamaterial shown in Figure 4 convincingly showed that the refraction of an electromagnetic wave at the interface between a vacuum and such a composite medium has a negative value of n .



Figure 4 – Combination of structures with negative dielectric and negative magnetic permeability [2]

Negative refractive index changes the geometric optics of lenses and other objects formed from area III materials. For example, the focusing lens becomes diffuse. In contrast, a deflecting bi-concave lens made of material III acts as a focusing lens. In addition, a conventional plane-parallel plate with $n = -1$ can act as a collecting lens [2].

Since metamaterials are structures with unique electromagnetic properties, they are widely used in the design and manufacture of various microwave devices. Resonators, phase shifters, filters, etc. are built on their basis.

Components of electromagnetic circuits with the properties of metamaterials are also used in antenna technology in the frequency range from 100 MHz to 100 GHz.

The main areas of use of metamaterials are:

- emitters located above the high-impedance surface;
- antennas with a radiating surface wave;
- reducing the mutual influence of antenna array elements, including in MIMO devices;
- increasing the gain of the horn antenna.