

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Расчет и исследование волноводных полосовых фильтров
миллиметрового (КВЧ) диапазона длин волн для нового поколения
высокотехнологичных устройств телекоммуникационных систем**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4061 группы
направления 11.03.02 Инфокоммуникационные
технологии и системы связи
Института физики
Иваниловой Екатерины Эдуардовны

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ А.В. Хохлов

Консультант
с.н.с, к.т. н. _____ Б.М. Кац

Зав. кафедрой радиофизики
и нелинейной динамики,
д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем телекоммуникации, связанное с переходом в более высокочастотные области спектра радиочастот, приводит к повышению требований к характеристикам многих компонентов радиосистем, в том числе, и частотно-селективных устройств. К таким требованиям относятся: низкие потери в полосах пропускания фильтров; высокий уровень заграждения в полосах режекции; линейность фазовых характеристик коэффициентов передачи в полосах пропускания фильтров; стабильность электрических параметров и частотных характеристик в условиях действия факторов внешней среды, включая изменения температуры и влажности, воздействие потоков высокоэнергетических частиц, механических ударов и вибрации; малые масса и габариты устройств.

Использование планарных технологий, основанных на применении полосковых, копланарных и микрополосковых линий передачи, позволяет обеспечить приемлемые характеристики устройств частотной селекции в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн при уменьшенных габаритных размерах фильтров и высокой надежности. В то же время, использование таких технологий для реализации устройств миллиметрового диапазона длин волн чаще всего ведет к неудовлетворительным результатам. Основными причинами этого являются следующие ограничения планарных технологий:

- высокие потери в планарных ЛП обусловленные малыми поперечными размерами токонесущих проводников, их конечной проводимостью и шероховатостью металлических поверхностей;
- наличие диэлектрических/магнитных потерь в материалах подложек;
- излучение электромагнитных полей с поверхности подложек;
- высокие технологические сложности либо невозможность обеспечить требуемую стабильность электрических параметров подложек

и геометрических размеров токонесущих проводников устройств частотной селекции.

Указанные ограничения особенно проявляются при попытках реализации полосно-пропускающих фильтров миллиметрового диапазона длин волн с узкими полосами пропускания и повышенной режекцией.

Таким образом, проблема проектирования и производства устройств частотной селекции миллиметрового диапазона длин волн является *актуальной* для современного этапа развития техники СВЧ.

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является расчет и исследование волноводных полосовых фильтров миллиметрового (КВЧ) диапазона для нового поколения высокотехнологичных устройств телекоммуникационных систем. Работа выполнялась в рамках НИОКР, выполняемой в одном из малых предприятий г. Саратова, с целью разработки двух типов супергетеродинных приемников миллиметрового диапазона длин волн.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы (ВКР) были поставлены следующие *задачи*:

1. Изучить классические и современные методы проектирования фильтров на основе соединения высокодобротных СВЧ резонаторов;
2. Выполнить анализ известных конструкторско-технологических решений, применение которых возможно для мелкосерийного производства узкополосных полосно-пропускающих фильтров мм-диапазона длин волн;
3. Выбрать оптимальные, с точки зрения доступных технологий, структуры фильтров и разработать электродинамические модели 2-х типов полосно-пропускающих фильтров;
4. На основе имеющихся технических требований к параметрам фильтров выполнить синтез фильтров и рассчитать их оптимальные геометрические размеры;

5. Выполнить настройку изготовленных фильтров и их экспериментальное исследование;

6. Проанализировать полученные результаты и эффективность использованной методики проектирования.

Выпускная квалификационная работа состоит из списка использованных сокращений, введения, двух теоретических разделов: «Фильтры в радиотехнике и технике СВЧ» и «Реализация ППФ мм-диапазона длин волн» и одного практического – «Синтез и экспериментальное исследование ППФ», заключения, списка использованных источников.

В первом разделе рассматриваются общие сведения об устройствах частотной селекции, а также, основные типы фильтров, их технические параметры и частотные характеристики.

Во втором разделе ВКР изучаются основные аспекты реализации ППФ мм-го диапазона длин волн. Здесь же рассматриваются линии передачи и резонаторы на основе прямоугольных волноводов, и реактивности, вносимые в волновод, с их эквивалентными схемами замещения.

Третий раздел ВКР посвящается синтезу и экспериментальному исследованию ППФ. В данной части рассматриваются проектирования электродинамических моделей ППФ двух типов, а также, соответствующих им КВП. Затем, показываются конструкции, технологии изготовления и проводятся экспериментальные исследования полученных образцов.

В заключении подводятся основные итоги работы. Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы о возможности практического применения рассмотренных конструкций частотно-селективных устройств.

Научная новизна исследования состоит в том, что в результате работы были разработаны два типа узкополосных волноводных ППФ на основе объемных прямоугольных металлических резонаторов с индуктивными связями и винтами настройки, пригодных для применения в различных системах радиосвязи или радиолокации.

Основное содержание работы

Первая теоретическая часть содержит в себе анализ общих сведений об устройствах частотной селекции: фильтрах и мультиплексорах, а точнее, рассмотрение основных типов фильтров, их технических параметров и частотных характеристик. В связи со сложностью реализации на сверхвысоких частотах элементов с сосредоточенными параметрами (конденсаторов, индуктивностей) фильтры СВЧ часто строят на основе соединения элементов с распределенными параметрами в виде резонаторов, шлейфов, отрезков линий передачи и т.д.

В четвертом подразделе выделены и изучены основные этапы синтеза фильтров на основе технологии низкочастотных прототипов. Наиболее эффективно использование такой методики для разработки ФНЧ и ППФ с относительно узкими полосами пропускания. Данный метод основан на замещении схемы реального фильтра СВЧ с распределенными параметрами лестничной схемой ФНЧ с сосредоточенными параметрами, для которого задана аппроксимация АЧХ в виде физически реализуемой функции передачи.

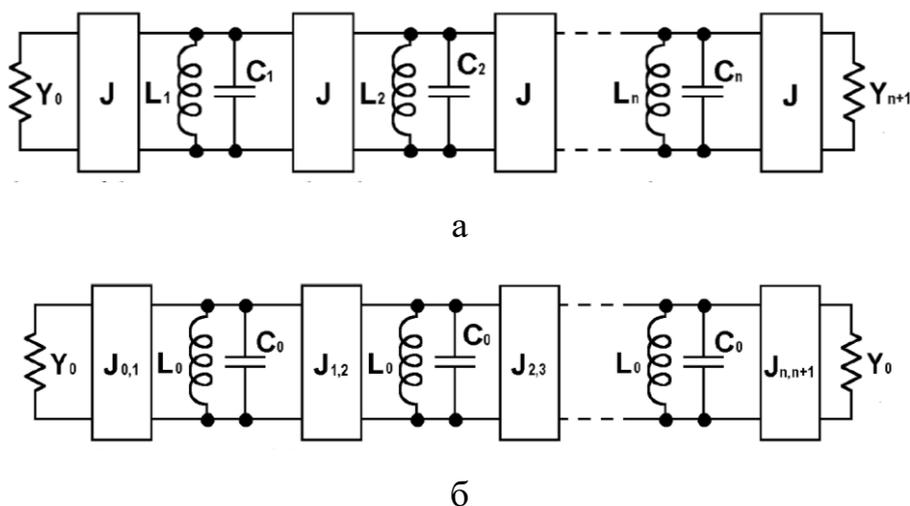


Рисунок 1 - ППФ на основе параллельных резонаторов и инверторов адмитанса:

а - случай одинаковых инверторов, б – случай одинаковых резонаторов

Детально были проанализированы наиболее распространенные типы аппроксимации АЧХ фильтров: Баттерворта, Чебышева и Эллиптический.

Изучены особенности их применения и используемые формулы преобразования прототипов.

Во второй части представлены возможные конструкции и этапы реализации ППФ мм-диапазона длин волн. Для каждой из рассмотренных конструкций фильтров можно указать совокупность свойств, определяющих их достоинства и недостатки, а также области преимущественного использования. Необходимо отметить, что применение таких фильтров в мм-диапазоне предполагает выполнение некоторых общих требований к ним, гарантирующих достижение максимальной собственной добротности резонаторов:

- использование резонаторов с максимально возможными размерами резонаторов и минимальной площадью;
- обеспечение минимальной шероховатости внутренних поверхностей резонаторов;
- покрытие внутренних поверхностей резонаторов материалами с высокой токопроводностью (серебро либо медь).

После рассмотрения свойств и технологических возможностей производства, выделены базовые конструкции, подходящие для дальнейшего исследования.

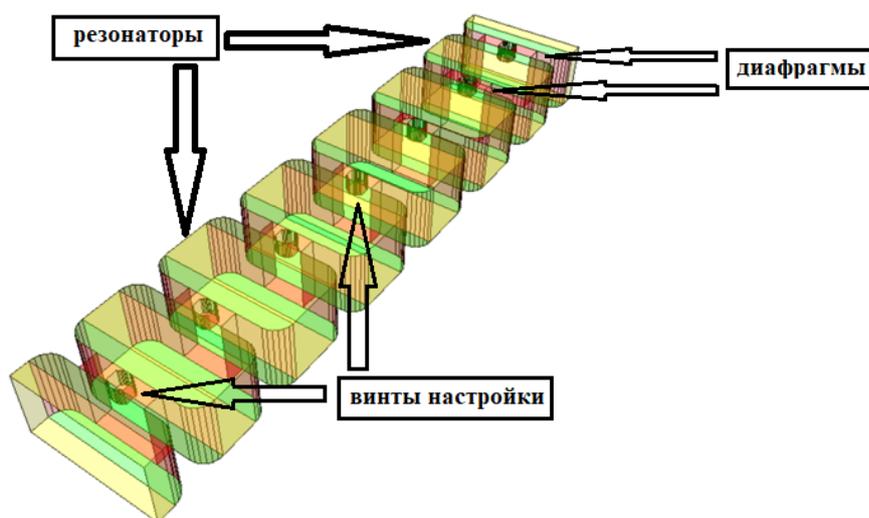


Рисунок 2 – Конструкция волноводного ППФ на основе объемных прямоугольных металлических резонаторов с индуктивными связями и винтами настройки связи

В этом же разделе изучены элементы связи в волноводах: реактивные диафрагмы и штыри, вносимые в волновод и их эквивалентные схемы замещения. Так, в плоскости индуктивной диафрагмы, которая наиболее часто применима на практике, электрическое поле имеет такой же характер, как и в основном волноводе, а магнитные силовые линии деформируются. Края отверстия индуктивной диафрагмы параллельны вектору E , поэтому такая диафрагма практически не снижает пропускаемой мощности.

В качестве перестраиваемых реактивных элементов в волноводах используются штыри с изменяемой глубиной погружения. Обычно такие штыри, выполненные в форме винтов, устанавливаются в центре широкой стенки волновода. Величина реактивности, вносимой штырем, зависит от его диаметра и длины (глубины погружения). Включение в конструкцию ППФ штырей-винтов позволяет в процессе настройки фильтра изменять как резонансные частоты резонаторов, так и коэффициенты связи между ними.

В третьей практической части был показан полный процесс синтеза узкополосных волноводных ППФ. Одним из часто используемых инструментов численного анализа и моделирования таких структур является метод конечного интегрирования (МКИ) и пакет программ на его основе CST Microwave Studio (CST MS). Однако, сложность конструкций волноводных фильтров исключает практическую возможность их размерного синтеза в среде CST Microwave Studio. Поэтому основное применение находят различные варианты численно-аналитических методов, предполагающие двухэтапную процедуру решения задачи синтеза. На первом этапе на основе заданных технических требований к фильтрам выполняют расчет прототипа ФНЧ и преобразование структуры прототипа ФНЧ к структуре ППФ. На втором этапе выбирают вариант физической реализации ППФ и определяют оптимальные геометрические размеры элементов ППФ.

В первом подразделе приведен список технических требований, необходимых для разрабатываемых изделий. С учётом требований к собственной добротности резонаторов и необходимости использования

коаксиальных портов для реализации ППФ выбрана структура, включающая волноводный ППФ и два коаксиально-волноводных перехода.

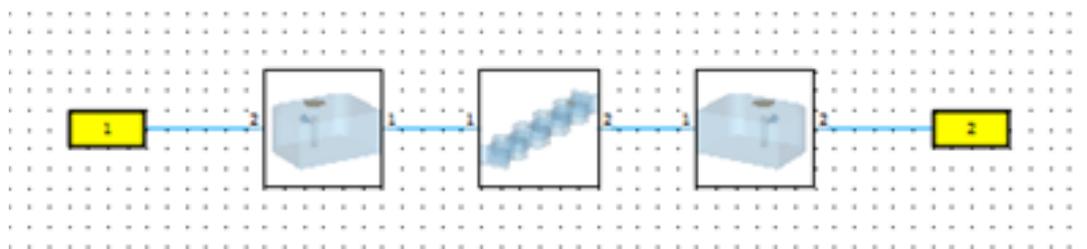


Рисунок 3 – Структуры ППФ мм-диапазона длин волн

Со второго по пятый подразделах рассматриваются резонаторы на основе прямоугольного волновода и разработки электродинамических моделей одиночных и связанных парных резонаторов, а также целых фильтров. Рассчитываются и проектируются коаксиально-волноводные переходы для ППФ двух типов. Теоретически рассчитанные данные подтверждаются результатами компьютерного моделирования в среде CST MS.

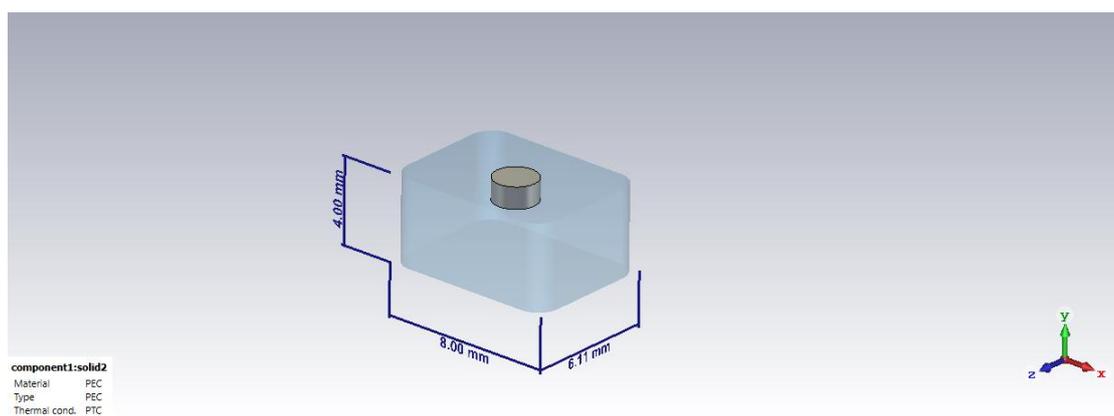


Рисунок 4 - Геометрическая модель резонатора с штырем настройки

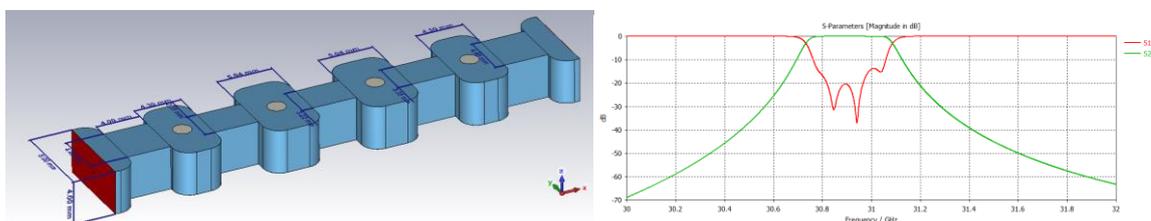


Рисунок 5 - Геометрическая 3D модель волноводного ППФ первого типа и его частотная характеристика

Конструкции и технологии изготовления ППФ двух типов показаны в шестом подразделе. Для изготовления опытных образцов фильтров использован фрезерный станок с ЧПУ и специальные прецизионные фрезы. В

этом же пункте приведены обоснования необходимости нанесения финишного покрытия на корпуса устройств.

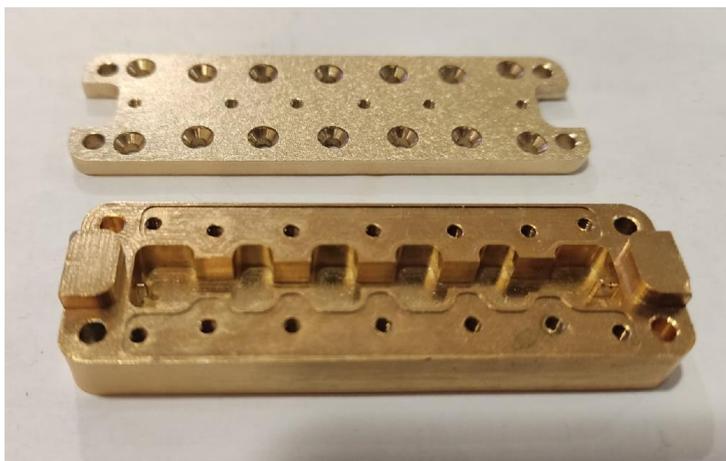


Рисунок 6 –Элементы ППФ первого типа с центральной частотой 30,5 ГГц

В седьмом подразделе описывается экспериментальное исследование изготовленных волноводных фильтров с помощью векторного анализатора цепей с двумя измерительными портами модель ZVA50.

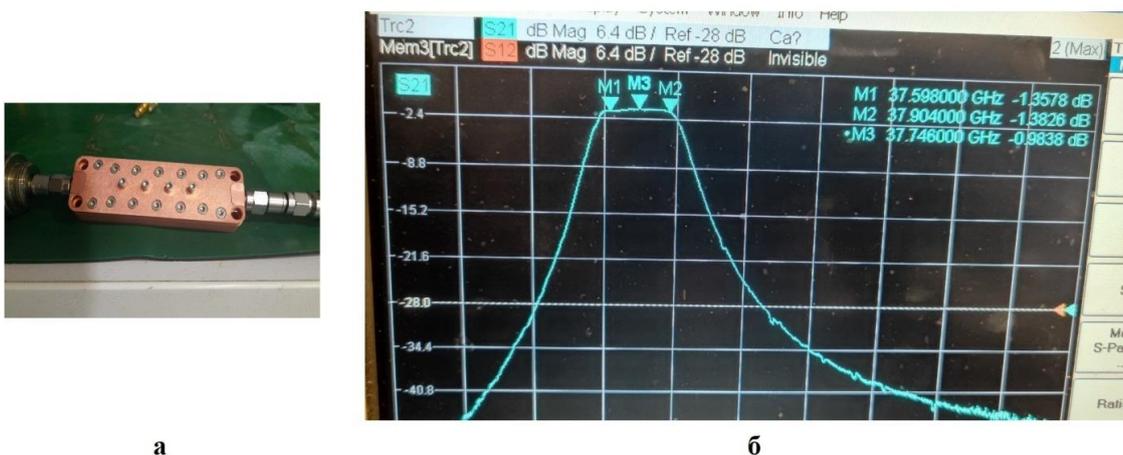


Рисунок 7 - Внешний вид в сборке (а) и результаты измерения частотных характеристик ППФ с центральной частотой 37,75 ГГц (б)

Таким образом, разработанные в ходе работы волноводные полосно-пропускающие фильтры КВЧ диапазона имеют приемлемые для практического применения технические параметры и могут быть включены в состав систем радиосвязи (спутниковой и наземной) и радиолокации мм-диапазона длин волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была достигнута цель выпускной квалификационной работы, а именно, рассчитаны топологии и проведены исследования полученных характеристик волноводных полосовых фильтров миллиметрового диапазона длин волн, пригодных для использования в конструкциях нового поколения высокотехнологичных устройств телекоммуникационных систем.

При этом были успешно решены задачи, поставленные в начале исследования. Получены следующие результаты:

1. Показана технологическая целесообразность использования для реализации узкополосных ППФ с коаксиальными выходными портами конструкций на основе прямоугольных объемных СВЧ резонаторов с индуктивными связями и скругленными краями;

2. На основе декомпозиционного подхода к проектированию сложных комплексированных изделий СВЧ электроники и программной среды CST Microwave Studio выполнена разработка проектов двух типов ППФ миллиметрового диапазона длин волн. Структуры фильтров образованы каскадным соединением коаксиально-волноводных переходов и волноводных ППФ.

3. Выполнено проектирование фильтров на основе соединения высокодобротных СВЧ резонаторов, а также, рассчитаны оптимальные геометрические размеры элементов КВП и волноводных ППФ;

4. С использованием векторного анализатора цепей Agilent Tech (модель ZVA 50) выполнена настройка и экспериментальное исследование двух типов ППФ миллиметрового диапазона длин волн с коаксиальными соединителями в канале 2.92/1.27 мм;

5. Показана необходимость нанесения гальванического покрытия на внутренние поверхности ППФ с целью достижения требуемых потерь в полосах пропускания.

Как показало исследование, рассчитанные волноводные полосно-пропускающие фильтры имеют приемлемые для практического применения характеристики и могут быть включены в состав систем радиосвязи (спутниковой и наземной) и радиолокационных систем мм диапазона длин волн. Одним из примеров применения разработанных волноводных фильтров является включение их в конструкцию устройств преобразования частоты, предназначенных, в первую очередь, для переноса спектра телекоммуникационного сигнала из одной частотной области в другую. Таким образом, в ходе выпускной квалификационной работы были проведены проектирование и исследование ППФ, которые могут быть применимы для нового поколения высокотехнологичных телекоммуникационных систем миллиметрового (КВЧ) диапазона.