

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

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

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2232 группы
направления 03.04.03 Радиофизика
Института физики
Иваниловой Екатерины Эдуардовны

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

Консультант
инженер ООО «НПП «Спектран» _____ С.А. Денисов

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

Саратов 2024 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, исследование и описание возможного применения в реальных устройствах 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. Рассмотреть устройство конвертера частоты миллиметрового диапазона длин волн, объяснить необходимость использования фильтров волноводных конструкций;
3. Выполнить анализ известных конструкторско-технологических решений, применение которых возможно для мелкосерийного производства узкополосных полосно-пропускающих фильтров мм-диапазона длин волн;
4. Выбрать оптимальные, с точки зрения доступных технологий, структуры фильтров и разработать электродинамические модели 2-х типов полосно-пропускающих фильтров;

5. На основе имеющихся технических требований к параметрам фильтров выполнить синтез фильтров и рассчитать их оптимальные геометрические размеры;

6. Выполнить настройку изготовленных фильтров и их экспериментальное исследование, в том числе, при смене материалов и технологического процесса изготовления фильтров;

7. Проанализировать полученные результаты и эффективность использованной методики проектирования.

В первом разделе рассматриваются общие сведения об устройствах частотной селекции, а также, основные типы фильтров, их технические параметры и частотные характеристики. В этой же части работы рассмотрены основные этапы синтеза фильтров на основе технологии низкочастотных прототипов.

Второй раздел ВКР посвящается рассмотрению назначения и устройства конвертора частоты миллиметрового диапазона длин волн – устройства переноса частоты. В этой же части описан принцип работы конкретных модулей подобных устройств и приведена схема одного из каналов переноса частоты, в составе которого необходимо применить полосовой фильтр с минимальными прямыми потерями, вносимыми в общий тракт, и заданным уровнем заграждения на определенных частотах.

В третьем 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.

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

Пятая часть ВКР содержит сведения об изменении материалов изготовления и технологического процесса производства опытных образцов ранее рассматриваемых частотно-селективных устройств, с целью улучшения их частотных характеристик. Также, проводятся экспериментальные исследования полученных изделий и сравнение их передаточных характеристик с ранее рассматриваемыми в предыдущей части работы образцами. Приводятся характеристики УПЧ с включением в тракт волноводных ППФ различных вариантов изготовления.

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, оптимизированы, произведены и настроены 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.

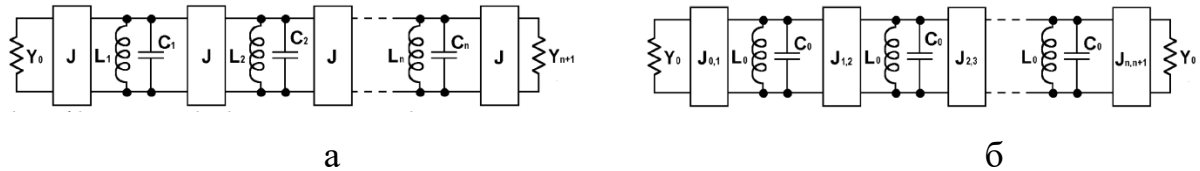


Рисунок 1 - ППФ на основе параллельных резонаторов и инверторов адмитанса:

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 были рассмотрены устройства, в составе которых необходимо использовать ППФ с наименьшими прямыми потерями, вносимыми в общий тракт. Примером такого устройства послужил конвертер частоты миллиметрового диапазона длин волн – устройство переноса частоты (УПЧ). В данной части детально описывается принцип работы подобных устройств, а также функциональное назначение каждого из составных элементов канала ПЕРЕНОС ВНИЗ.

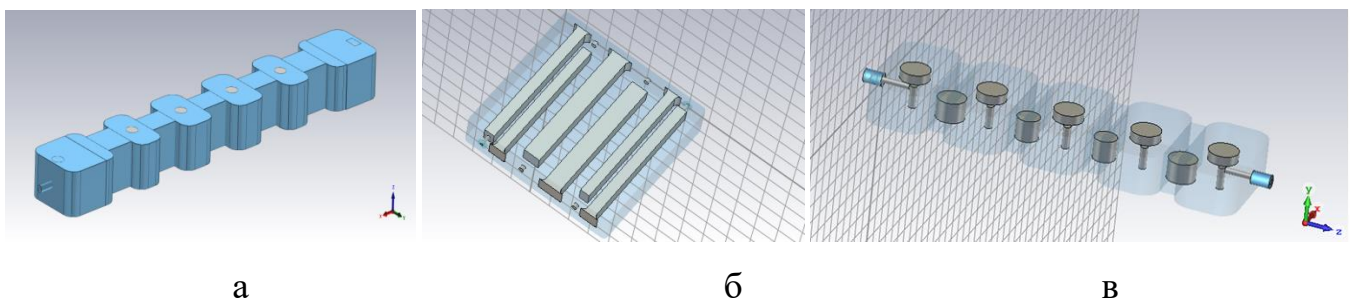


Рисунок 2 – Конструкции волноводных ППФ: а – на индуктивных диафрагмах с винтами подстройки, б – встречно-стержневая, в – смешанного типа Compline

Рабочие характеристики систем, подобных УПЧ, во многом определяются электродинамическими параметрами входящих в их

конструкции фильтров. Поэтому, в третьем подразделе, приводится подробное объяснение выбора конструкции волноводного полосового фильтра, способного обеспечить приемлемые передаточные характеристики при его включении в тракт УПЧ.

В третьей части представлены этапы реализации ППФ мм-диапазона длин волн. Для выбранной конструкции фильтров можно указать совокупность свойств, определяющих ее достоинства и недостатки. 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, выделена базовая конструкция, подходящая для дальнейшего производства и исследования.

В этом же разделе изучены элементы связи в волноводах: реактивные диафрагмы и штыри, вносимые в волновод и их эквивалентные схемы замещения. 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.

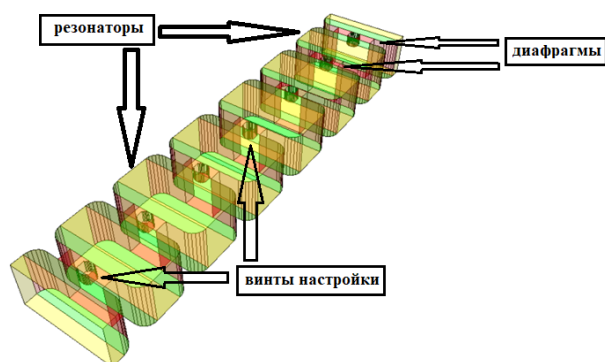


Рисунок 3 – Конструкция волноводного ППФ на основе объемных прямоугольных металлических резонаторов с индуктивными связями и винтами настройки связи

В четвертой 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.

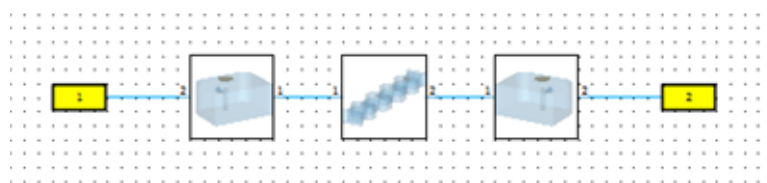


Рисунок 4 – Структуры ППФ мм-го диапазона длин волн

Со второго по пятый подраздел 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.

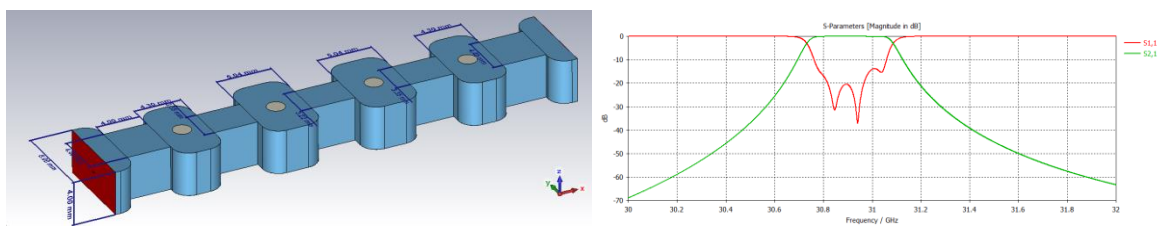


Рисунок 5 - Геометрическая 3D модель волноводного ППФ первого типа и его частотная характеристика

Конструкции и первоначальные технологии изготовления ППФ двух типов из латуни Лс59 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.

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

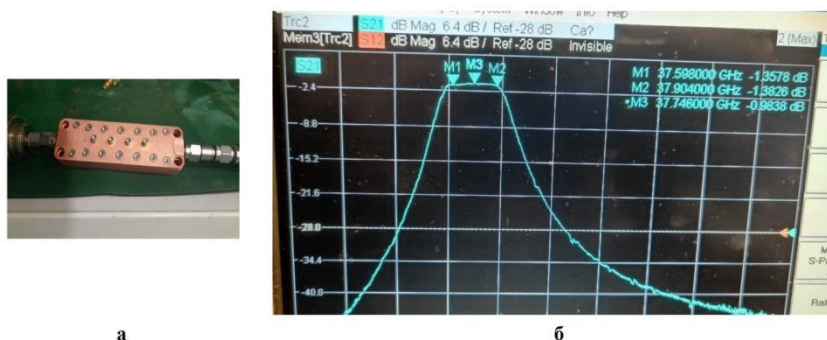


Рисунок 6 - Внешний вид в сборке (а) и результаты измерения частотных характеристик ППФ с центральной частотой 37,75 ГГц (б)

Пятая часть ВКР посвящена изменениям, вносимым в технологический процесс производства, с целью улучшения передаточных характеристик

устройств. С первого по третий подраздел рассматриваются и выбираются материалы изготовления корпусов, виды химических обработок поверхностей и гальванических покрытий на основе драгоценных металлов, способных положительно повлиять на частотные характеристики.

Основные этапы нового технологического процесса производства, а именно, изготовления корпусов изделий из сплава алюминия АМг5М, последовательность предварительной обработки и нанесения финишного покрытия серебра с промежуточным подслоем меди, показаны в четвертом подразделе.

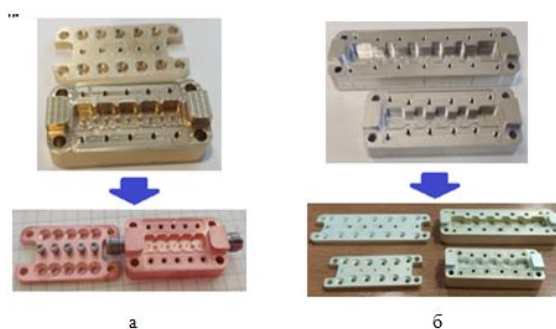


Рисунок 7 – Образцы ранее рассчитанных ППФ второго типа с различным технологическим процессом производства: а – латунный корпус, покрытый медью; б – алюминиевый корпус покрытый медью и серебром

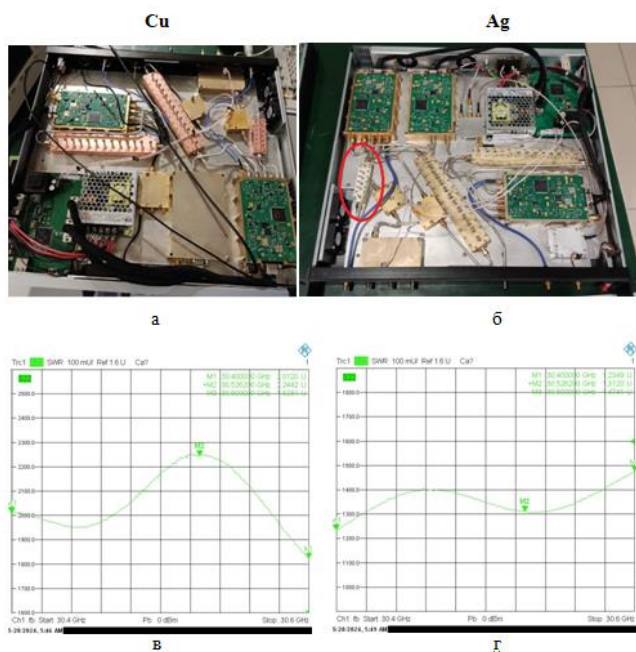


Рисунок 8 – Измерения КСВн УПЧ-30 с установленным латунным ППФ, покрытым медью (а, в) и с алюминиевым фильтром, покрытым серебром с подслоем меди (б, г)

Итоговый, пятый подраздел содержит детальное описание сборки и настройки опытных образцов ППФ, а также, сравнение полученных характеристик не только самих ППФ, но и УПЧ, в тракт которых включены данные фильтры, произведенные по различным технологиям.

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-го диапазона длин волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы поставленные задачи успешно выполнены.

Получены следующие результаты:

1. Показана необходимость использования волноводных ППФ в составе конвертеров частоты миллиметрового диапазона длин волн, а также 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 двух типов фильтров на основе соединения высокочастотных СВЧ резонаторов, а также, рассчитаны оптимальные геометрические размеры элементов КВП и волноводных ППФ;

4. С использованием векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz (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;

6. Выполнено сравнение передаточных характеристик частотно-селективных устройств при смене материалов и этапов технологического процесса производства опытных образцов, а также частотных характеристик устройств переноса частоты в миллиметровом диапазоне длин волн, в тракты которых включены разрабатываемые волноводные ППФ.

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-го диапазона длин волн. Одним из примеров применения разработанных волноводных фильтров является включение их в конструкцию устройств переноса 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 волноводных ППФ, которые вполне могут быть применимы для нового поколения высокотехнологичных устройств телекоммуникационных систем миллиметрового (КВЧ) диапазона, примером которых, в первую очередь, служат рассматриваемые в работе УПЧ.