

*На правах рукописи*

УДК 621.379.54

**ПРОКОПЬЕВ Тимур Викторович**

**Сверхузкополосный фильтр коротковолнового  
диапазона с высокоточной системой  
настройки**

Специальность 05.12.07 - Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и  
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения.

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Л.И. Пономарев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Бей Николай Арсеньевич

кандидат технических наук, доцент  
Баев Андрей Борисович

Ведущая организация: ФГУП НКТБ «Феррит», г.Воронеж

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) – МАИ по адресу:

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.03, к.т.н., доцент



М.И. Сычев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию методов, схем и алгоритмов управления параметрами высокодобротного фильтра коротковолнового диапазона, построенного на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов, включая анализ точности управления параметрами этого фильтра, а также разработке высокоточной системы настройки и перестройки ВТСП фильтра в широкой полосе частот КВ диапазона. В качестве основной области применения таких фильтров в диссертации рассматриваются узкополосная фильтрация (преселекция) на входе радиоприемных устройств (РПУ) КВ диапазона с целью существенного улучшения их характеристик, а также возможность согласования, настройки и перестройки электрически малых вибраторных антенн (ЭМВА).

### *Актуальность темы диссертации.*

В последние годы помеховая обстановка в радиоэфире становится все более сложной. Основная причина этого явления – быстрый рост количества используемых радиотехнических систем. Особенно это относится к КВ диапазону, где уровень взаимных помех на порядки превышает уровень полезного сигнала, а возможности пространственной селекции сигнала резко ограничены. Кроме того, из-за нелинейных явлений во входных цепях приемных устройств в последних возникает интермодуляционные и другие нелинейные искажения, фильтрация которых на промежуточной частоте малоэффективна.

Одним из наиболее удачных способов решения проблемы помехозащищенности систем связи является увеличение их частотной избирательности, что достигается с помощью управляемых высокодобротных фильтров. Требуемая на сегодняшний день величина

добротности подобных фильтров составляет  $10^4 \dots 10^5$  и более. Параметры традиционных фильтров не удовлетворяют вышеуказанным требованиям. В настоящее время существует несколько типов фильтров, предельно достижимые величины добротности которых позволяют приблизиться к существующим требованиям. В частности, достаточно большую величину добротности можно получить у фильтров на основе кварцевых резонаторов, но наряду с достоинствами, к которым относятся высокая стабильность и относительная простота конструкции, фильтры на кварцевых резонаторах обладают значительным недостатком - управление резонансной частотой в них возможно лишь в очень узких пределах. Весьма перспективной является разработка цифровых фильтров, однако, на сегодняшний день реализованные параметры аналого-цифровых преобразователей показывают, что подобные фильтры пока не в полной мере удовлетворяют требуемым характеристикам. Возможность управления центральной частотой в сочетании с высокой добротностью реализуется в фильтрах, выполненных на основе материалов, обладающих эффектом высокотемпературной сверхпроводимости. Достижения в этой области в ближайшее время приведут к широкому использованию ВТСП устройств (в особенности фильтров) в современной аппаратуре связи, о чем косвенно свидетельствует увеличивающееся число публикаций по данной тематике [18-20]. К настоящему времени известны работы, в которых рассматриваются фильтры с величиной добротности не менее  $10^5$  и с возможностью электромеханической перестройки центральной частоты в пределах нескольких октав. За последние годы созданы и запатентованы также ВТСП фильтры с электронной перестройкой частоты. Однако практическое применение ВТСП фильтров с электронной перестройкой частоты пока весьма ограничено из-за больших потерь в устройстве управления частотой и малого интервала перестройки. Поэтому наиболее пригодными для практического использования в настоящее время являются ВТСП фильтры с электромеханической перестройкой частоты в широкой полосе частот.

Весьма интересной областью применения перестраиваемого ВТСП фильтра является рассмотрение возможности его использования для настройки электрически малых вибраторных антенн (ЭМВА) КВ диапазона.

При разработке сверхузкополосных, с полосой пропускания в несколько сотен герц, перестраиваемых фильтров в КВ и других диапазонах серьезной проблемой является разработка системы управления характеристиками этих фильтров, в частности частотой настройки, полосой пропускания и другими параметрами. Так, точность настройки фильтра на частотах 1-30 МГц должна соответствовать точности настройки радиоприемного устройства, которая у современных РПУ КВ диапазона равна 1 Гц. При электромеханическом способе перестройки фильтра такая точность настройки на первый взгляд кажется нереализуемой. К началу исследований, проведенных в данной диссертации, в литературе практически отсутствовали какие либо сведения о практических реализациях подобных систем управления. А имеющиеся отдельные публикации по возможностям как электрической, так и электромеханической перестройки фильтров, не позволяют судить о возможности практического использования этих методов для высокоточной настройки ВТСП фильтров.

***Целью работы*** является исследование эффективных алгоритмов, схем и методов управления высокодобротным перестраиваемым ВТСП фильтром при использовании его в качестве преселектора в существующих РПУ, а также для настройки ЭМВА КВ диапазона; создание и экспериментальное исследование макетов систем управления перестраиваемым ВТСП фильтром и их сопряжение с ВТСП фильтром и существующими радиоприемными устройствами.

***Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:***

- проведен анализ параметров перестраиваемых ВТСП фильтров при использовании их в качестве преселектора и для настройки ЭМВА КВ диапазона;
- предложены и исследованы схемы и методы управления этими параметрами;
- предложен и проанализирован метод настройки и перестройки электрически малых вибраторов с помощью управляемого ВТСП фильтра;
- разработаны алгоритмы настройки ВТСП фильтров и проанализированы точностные характеристики различных методов управления перестраиваемых ВТСП фильтров и установлены требования, предъявляемые к отдельным блокам системы управления;
- по результатам теоретического анализа предложены, разработаны и экспериментально исследованы несколько макетов систем управления ВТСП фильтром, реализующих различные методы настройки;
- на основе проведенных исследований предложена структурная и принципиальная схема цифровой системы управления. Проведено сопряжение цифровой системы управления с ВТСП фильтром, радиоприемным устройством и проведены успешные испытания этой системы на объекте Заказчика.

***Методы исследований*** основываются на теоретическом и экспериментальном анализе предложенных способов управления параметрами и характеристиками ВТСП фильтров при их использовании для настройки электрически малых антенн и улучшении характеристик приемных устройств; на разработке алгоритмов настройки ВТСП фильтров

на частоту рабочего канала; на представлении систем управления в виде структурных схем с последующим расчетом с помощью теории цепей требований к отдельным блокам и определении влияния каждого из блоков на точность настройки ВТСП фильтра на частоту рабочего канала; на сравнительной теоретической оценке точности каждого из предложенных методов настройки и выборе оптимального метода настройки; на организации экспериментальной проверки макетов систем управления и сравнении результатов испытаний с теоретическими данными.

**Научная новизна работы** состоит в обосновании методов, схем и алгоритмов настройки узкополосного ВТСП фильтра в широкой полосе частот КВ диапазона и обосновании требований, предъявляемых к отдельным блокам системы управления для достижения максимальной точности настройки, соизмеримой с точностью установки на рабочую частоту современных РПУ; развитии методов управления параметрами перестраиваемых ВТСП фильтров; разработке макетов систем управления, позволяющих получить недостижимую ранее точность настройки ВТСП фильтром КВ диапазона, порядка несколько десятков герц в полосе перестройки несколько октав.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в развитии методов управления параметрами высокочастотных перестраиваемых ВТСП фильтров в КВ диапазоне и обосновании эффективности применения электромеханического способа управления частотой настройки ВТСП фильтра совместно с предложенной и реализованной системой управления; в разработке высокоточной системы управления частотой настройки сверхузкополосного электромеханически перестраиваемого ВТСП фильтра в полосе КВ диапазона, сопряжении системы управления с ВТСП фильтром и РПУ КВ диапазона и демонстрацией ее на объекте Заказчика. Практическая

ценность работы подтверждается востребованностью ее результатов в ходе выполнения ряда НИР и ОКР, а также грантов МинОбразования.

***Реализация и внедрение результатов работы.***

Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование. Основные результаты реализованы в ряде НИР и ОКР («Осман-Пр», «Круг-1МФП»). Системы управления прошли успешные испытания на объекте Заказчика. Результаты работы также использованы при выполнении следующих НИР: Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники «Сверхзкополосные перестраиваемые фильтры для радиотехнических систем связи» (шифр 406-03-06); Фундаментальные научные исследования «Развитие теории и методов эффективного излучения, приема и обработки сложных кодированных сигналов» (шифр 1.41.03).

***Достоверность полученных результатов*** обусловлена корректностью исходных положений и преобразований при разработке физических и математических моделей исследуемых устройств; логичным физическим представлением результатов математического моделирования; хорошим совпадением результатов теоретического анализа с результатами натурального эксперимента.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

1. Для реального совершенствования характеристик существующих приемных устройств КВ диапазона и настройки электрически малых антенн в настоящее время могут использоваться сверхзкополосные ВТСП фильтры и преселекторы только с электромеханической перестройкой частоты во всем КВ диапазоне.

2. Только в системе управления с обратной связью могут быть достигнуты высокая точность и малое время настройки ВТСП фильтров.



3. Наиболее целесообразным с точки зрения обеспечения требуемой точности и времени настройки ВТСП фильтра является применение двух методов настройки - амплитудного на этапе грубой настройки и амплитудно-разностного метода на этапе точной настройки.

4. В результате теоретического и экспериментального исследования созданы макеты аналоговой и цифровой систем управления, которые позволили осуществить эквивалентную точность позиционирования ВТСП фильтра порядка  $10^{-3} - 10^{-2}$  мкм. В результате точность настройки ВТСП фильтра достигла десятков герц во всем КВ диапазоне при времени перестройки 40...100 сек.

5. Комплексные испытания созданной цифровой системы управления ВТСП преселектором с РПУ на объекте Заказчика подтвердили правильность заложенных принципов и технологий. Достигнуто улучшение параметров РПУ: чувствительности (3дБ), избирательности (20дБ) при отстройке ближайшей помехи на 10кГц; улучшение динамического диапазона по интермодуляции (на 17дБ) при отстройке ближайшей помехи на 30кГц.

#### ***Апробация результатов работы.***

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на XII Военно-научной конференции «Развитие теории и практики строительства и применения войсковой ПВО в системе вооруженной борьбы ВС РФ» (Смоленск, военный университет войсковой ПВО ВС РФ, 22-23 апр. 2004); III Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Волгоград, 6-12 сент. 2004); Всероссийской конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии» (Сочи, 20-25 сент. 2004); IV Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Н.Новгород, 3-9 окт. 2005); Научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 100-летию со дня рождения д.т.н., проф., лауреата

гос. премии СССР, засл. деятеля науки и техники РСФСР Михаила Самойловича Неймана (Москва, МАИ, 17-18 марта 2005); Всероссийской молодежная научной конференций с международным участием «VIII Королевские чтения» (Самара, 4-6 окт. 2005); VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 17-21 сент. 2007г.); XIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 15-17 апр. 2008).

### ***Публикации.***

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 15 печатных работ [1-14], из них 3 научные статьи, 11 докладов опубликованных в соответствующих изданиях, получен один патент РФ [15]. Одна заявка на патент находится на стадии рассмотрения [16].

### ***Структура и объем работы.***

Диссертационная работа изложена на 201 машинописных страницах, включая 20 страниц приложения, и состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Иллюстративный материал представлен в виде 107 рисунков и 11 таблиц. Список использованных источников включает 74 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки перестраиваемого ВТСП фильтра, управляемого системой управления, используемого для улучшения характеристик антенно-приемных устройств КВ диапазона, сформулирована цель и задача исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрены основные направления использования и области применения управляемых ВТСП фильтров. Структурная схема использования ВТСП фильтров в антенно-приемных устройствах показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Использование ВТСП фильтра в качестве преселектора радиоприемного устройства.

Диапазон частот в приемниках КВ диапазона лежит в интервале от 1 МГц до 32 МГц с гарантированной точностью установки частоты 1 Гц во всем диапазоне перестройки. Полоса сигнала лежит в интервале от 300 Гц до 10 кГц. Таким образом, преселектор для антенно-приемных устройств КВ диапазона должен иметь регулируемую полосу пропускания от 0.3 кГц до 10 кГц и диапазон перестройки рабочей частоты в пять октав при точности установки частоты порядка 1 – 10 Гц и высоком коэффициенте передачи.

В главе рассмотрены зависимости диапазонных и энергетических (КПД) параметров электрически малых вибраторных антенн от размеров плеча симметричного вибратора и добротности ВТСП контура. Показано, что подобный контур может быть использован для уменьшения размеров антенны КВ диапазона, а также для построения сверхузкополосных антенн-датчиков. В частности, на рисунке 2 показана потенциальная возможность уменьшения длины плеча вибратора в зависимости от требуемой полосы пропускания. Возможная схема настройки ЭМВА показана на рисунке 3. Установлено, что подобная схема при высокой добротности ВТСП контура может использоваться в качестве сверхузкополосного (с полосой около 10 Гц) антенны-датчика.

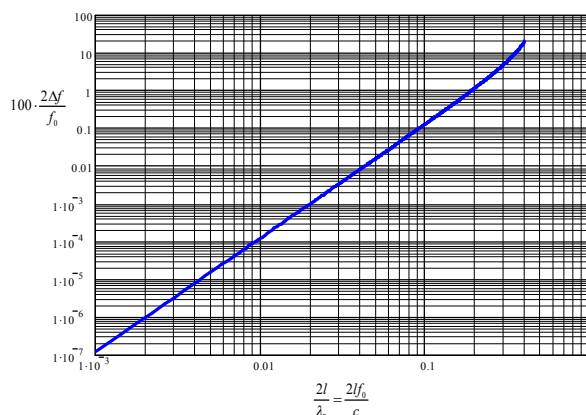


Рисунок 2 - Зависимость полосы пропускания от размеров антенны.

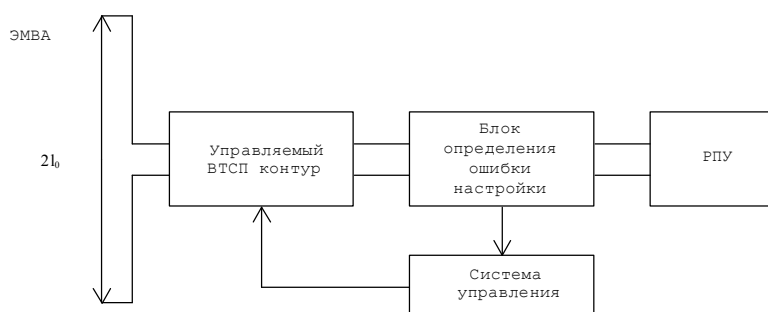


Рисунок 3 - Возможная схема настройки ЭМА с помощью ВТСП контура.

**Вторая глава** посвящена анализу способов перестройки рабочей частоты ВТСП фильтров с электромеханической перестройкой частоты и полосы.

Одним из возможных способов реализации электромеханического способа перестройки ВТСП фильтра с использованием перемещения его составных частей с помощью пьезодвигателя показан на рисунке 4. На нем введены следующие обозначения: 1 – сосуд Дьюара; 2 – пластиковый стакан; 3 – фторопластовый стакан; 4 – основание; 5 – пьезодвигатель; 6 – вал пьезодвигателя; 7 – фторопластовая насадка; 8 – вставки из LaAlO<sub>3</sub>; 9 – катушка; 10 – кабели с петлями связи; 11 – уровень жидкого азота.

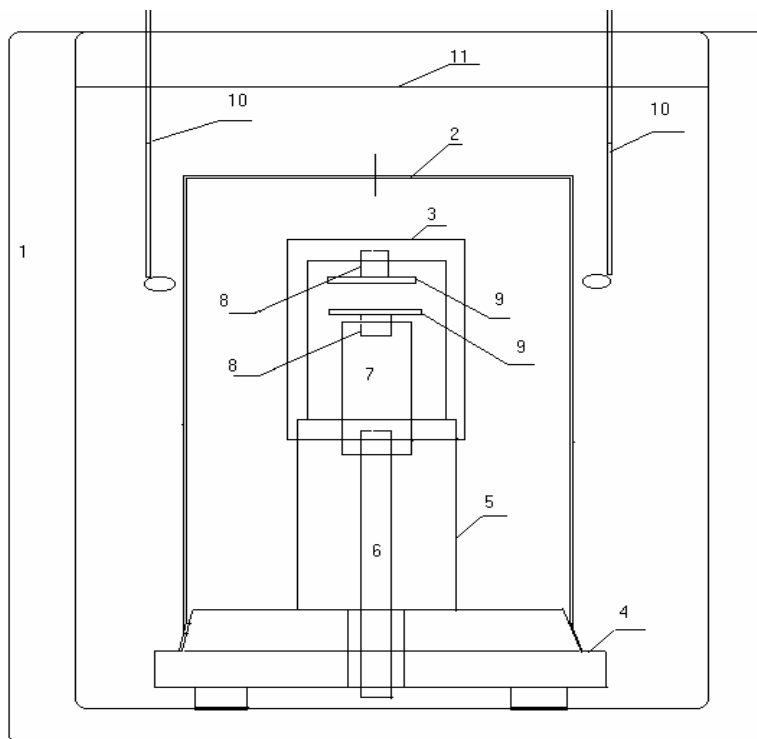


Рисунок 4 - Эскиз конструкции ВТСП фильтра с помещенным в жидкий азот пьезодвигателем.

Разработанный ранее [17] ВТСП фильтр обладал при механическом перемещении пластин полосой перестройки свыше 2-х октав в КВ диапазоне и возможностью управления полосой пропускания в пределах 0.3-3кГц и более. При использовании двух переключаемых ВТСП фильтров диапазон перестройки расширялся до 4 – 5 октав.

В главе обоснованы требования, предъявляемые к системе управления рассматриваемого фильтра. Исследованная ранее [18] кривая настройки ВТСП фильтра имеет ярко выраженный нелинейный характер (рисунок 5).

Определенное по этой кривой приращение рабочей частоты фильтра на единичное изменение расстояния максимально в низкочастотной части рабочего диапазона, и составляет  $(\partial f_p / \partial L)_{\max} = 27$  кГц/мкм. Соответственно в высокочастотной части рабочего диапазона  $(\partial f_p / \partial L) = 3,5$  кГц/мкм. Анализ характеристик разработанного ВТСП фильтра и пьезопривода позволяет установить взаимосвязь между характеристиками этих узлов и точностными характеристиками настройки и электромеханической настройкой фильтра. Для настройки фильтра с точностью 1 Гц (типовая точность настройки существующих приемников КВ диапазона) минимальный дискрет перемещения пластин должен составлять  $\delta l_{\min} = 0,35 \left[ \frac{\Gamma_{\mathcal{U}}}{A} \right]$ . Понятно, что подобная точность фиксации электромеханического перемещения требует разработки специальных методов настройки и управления ВТСП фильтром, которые рассматриваются в следующих разделах.

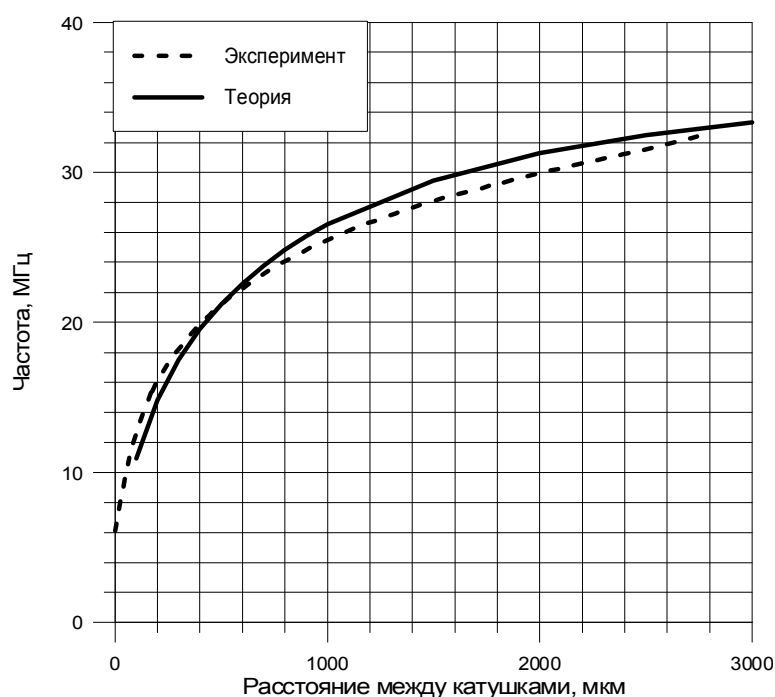


Рисунок 5 - Экспериментально и теоретически рассчитанные зависимости частоты ВТСП фильтра от расстояния между подложками.

**В третьей главе** рассматривается требуемый алгоритм работы системы управления. В начальный момент, когда на вход системы управления

поступает значение частоты рабочего канала, система должна определить значение исходной частоты ВТСП фильтра, не известной на начальный момент, сравнить его с требуемым значением, затем осуществить перестройку фильтра в требуемом направлении сначала в быстром, а затем в точном режиме. Понятно, что такая система управления является системой с обратной связью. Т.е. управляющее воздействие формируется на основе данных о требуемом значении частоты настройки и информации о текущем значении центральной частоты ВТСП фильтра. В главе рассмотрены различные методы определения начальной частоты и настройки электромеханически перестраиваемого ВТСП фильтра на частоту рабочего канала.

Как наиболее пригодные для практического построения систем управления, обоснованы следующие методы: автогенераторный и амплитудный – для определения начальной частоты и грубой настройки, амплитудный и амплитудно-разностный метод – для точной настройки ВТСП фильтра. Рассмотрим подробнее методы определения начальной частоты.

Автогенераторный метод заключается в использовании ВТСП фильтра в составе автогенератора. Этот метод позволяет с минимальными временными затратами (доли секунды) определять частоту ВТСП фильтра, однако установлено, что при работе с этим методом в широком диапазоне частот возникает неустойчивая работа генератора из-за нарушения баланса амплитуд и фаз.

Этого недостатка лишен амплитудный метод, структурная схема которого показана на рисунке 6. В процессе определения текущей частоты ВТСП фильтра, весь рабочий диапазон фильтра сканируется генератором, при этом контролируется амплитуда выходного сигнала. Когда частота сигнала, подводимого ко входу ВТСП фильтра, достигнет начальной частоты фильтра блок определения максимума выделяет этот момент и сканирование по частоте прекращается. Частота, при которой прекратилось сканирование, и считается начальной частотой ВТСП фильтра.

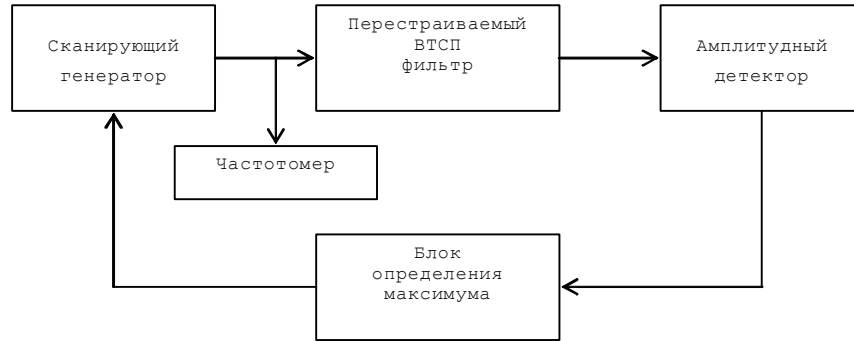


Рисунок 6 – Структурная схема определения частоты ВТСП фильтра методом максимума.

Очевидно, что этот метод требует больших временных затрат, чем автогенераторный метод, из-за узкополосности фильтра и значительного (примерно 200000 полос фильтра) диапазона возможных значений начальной частоты. В главе определена возможная скорость перестройки частоты подаваемого сигнала в процессе определения начальной частоты фильтра (или скорость перестройки фильтра в процессе настройки), для случаев, когда амплитуда колебаний на выходе фильтра достигала заданного уровня (0.9 и 0.1) от стационарного значения. Для этого рассмотрена модель, когда на фильтр поступает радиоимпульс с частотой заполнения, равной центральной частоте фильтра, и длительностью, зависящей от скорости сканирования и ширины полосы пропускания фильтра. Установлено, что амплитуда сигнала на выходе фильтра определяется выражением

$$U(t) = \begin{cases} \frac{K_{rez} \cdot U_m}{\sqrt{1 + (\delta\omega \cdot \tau_k)^2}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_k}} \cdot \cos(\delta\omega \cdot t) + e^{-\frac{2t}{\tau_k}}} & , 0 < t < \frac{2\Delta f_k}{V_{sk}} \\ \frac{K_{rez} \cdot U_m}{\sqrt{1 + (\delta\omega \cdot \tau_k)^2}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot e^{-\frac{2\Delta f_k}{V_{sk} \cdot \tau_k}} \cdot \cos(\delta\omega \cdot t) + e^{-\frac{2 \cdot 2\Delta f_k}{V_{sk} \cdot \tau_k}}} \cdot \exp\left(-\frac{t - \frac{2\Delta f_k}{V_{sk}}}{\tau_k}\right) & , t \geq \frac{2\Delta f_k}{V_{sk}} \end{cases} \quad (1)$$



где  $\delta\omega$  - расстройка между частотой входного сигнала и центральной частотой фильтра (в данном случае  $\delta\omega=0$ ),  $2\Delta f_k$  - полоса пропускания фильтра,  $v_{sk}$  - скорость сканирования по частоте [Гц/с],  $\tau_k$  - постоянная времени фильтра,  $\tau_k = \frac{Q}{\pi \cdot f_0}$ ,  $Q$  - добротность,  $f_0$  - центральная частота,  $K_{rez} \cdot U_m$  - амплитуда колебаний с частотой, равной центральной на выходе в установившемся режиме,  $K_{rez}$  - коэффициент передачи фильтра.

Время сканирования было рассмотрено исходя из значений амплитуды колебаний на выходе ВТСП фильтра в процессе сканирования 0.9 и 0.1 от амплитуды в установившемся режиме. Соответственно для первого случая проход всего диапазона займёт приблизительно 25 мин, для второго 18 сек. На практике было установлено, что уровень амплитуды 0.1 от амплитуды в установившемся режиме, надёжно фиксируется (при  $U_{вх. макс} = 5$  мВ) блоком определения максимума, построенным на 10-разрядном аналого-цифровом преобразователе. Дальнейшее понижение этого уровня приводит к сбоям в работе системы.

Для реализации системы управления ВТСП фильтром предложено использовать амплитудный метод на этапе быстрой и грубой настройки и амплитудно-разностный метод на этапе точной настройки. В процессе точной настройки ВТСП фильтра с помощью амплитудного метода система работает как и при определении начальной частоты. Отличие состоит в том, что вместо изменения частоты, подаваемого на вход фильтра сигнала, с помощью пьезопривода “перемещается” рабочая частота фильтра. Частота сигнала, подаваемого на вход фильтра, при этом устанавливается равной частоте рабочего канала. Установлено, что амплитудный метод не обеспечивает требуемой точности настройки.

Более высокой точностью обладает предложенный амплитудно-разностный метод точной настройки (рисунок 7), в котором используется тестовый сигнал. Тестовый сигнал, формируемый в формирователе частоты

рабочего канала (ФЧРК), представляет собой две гармоники на частотах  $f_0 \pm \Delta f$ , поочередно подаваемые на вход контура. Сигнал с выхода ВТСП фильтра через коммутатор (К) поступает на приёмник тестового сигнала (ПТС), который анализирует этот сигнал и с помощью формирователя сигнала управления (ФСУ) формирует сигнал управления частотой ВТСП фильтра. Этот сигнал усиливается в высоковольтном адаптере (ВВА) и воздействует на пьезодвигатель, осуществляющий механическую перестройку ВТСП фильтра.

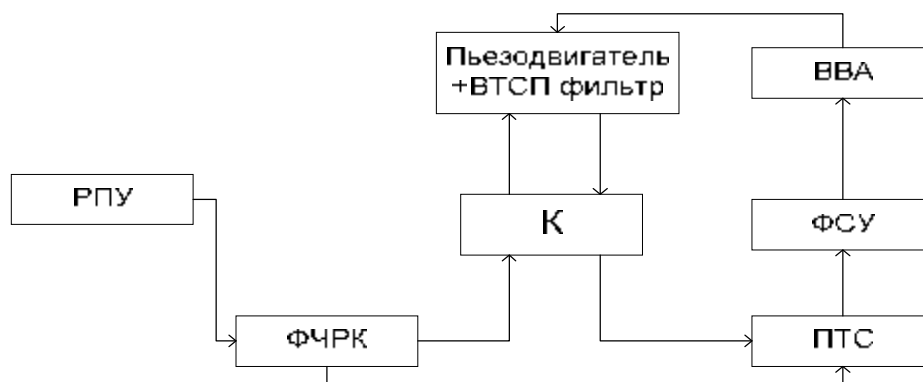


Рисунок 7 – Структурная схема системы управления для настройки ВТСП фильтра амплитудно-разностным методом.

**Четвертая глава** посвящена анализу точностных и временных характеристик настройки ВТСП фильтра амплитудным и амплитудно-разностным методом. С использованием амплитудно-частотных характеристик ВТСП фильтров получены соотношения для оценки точности настройки рассмотренных методов. Исходя из расчета точностных показателей каждого из методов сформулированы требования, предъявляемые к блокам, входящим в систему настройки и к блоку управления пьезодвигателем ВТСП фильтра.

Произведен анализ точности настройки фильтра при использовании амплитудного метода. Основной фактор, влияющий на точность данного

метода – неточность фиксации максимума амплитудно-частотной характеристики ВТСП фильтра блоком определения максимума. Амплитуда на выходе фильтра  $U_{\text{ВЫХ}}(f)$  зависит от напряжения на входе  $U_{\text{ВХ}}(f)$  (при гармоническом входном сигнале). Получено выражение, показывающее, какая будет ошибка по частоте  $\delta f$  при заданной неточности фиксации максимума амплитуды  $\Delta|U_{\text{ВЫХ}}(f_0)|$  блоком определения максимума

$$\delta f \approx \sqrt{-\frac{\Delta f_k^2}{|U_{\text{ВХ}}(f_0)| \cdot n} \cdot \Delta|U_{\text{ВЫХ}}(f_0)|}. \quad (2)$$

На рисунке 8 показана зависимость ошибки настройки ВТСП фильтра по частоте от нормированного (по отношению к амплитуде сигнала на входе ВТСП фильтра) значения неточности фиксации максимума амплитуды блоком определения максимума для различных значений полосы ВТСП фильтра. Эта зависимость использовалась при построении блока определения максимума систем управления с амплитудным методом, в частности, для определения разрядности применяемого АЦП.

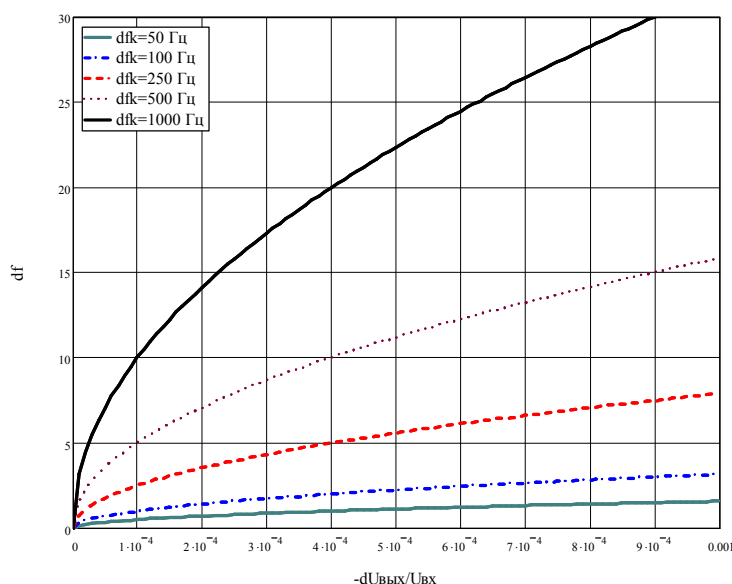


Рисунок 8 – Зависимость ошибки настройки по частоте от нормированного значения неточности фиксации максимума амплитуды блоком определения максимума.

Произведен анализ точности настройки фильтра при использовании амплитудно-разностного метода. Так для одиночного ВТСП контура установлена связь сигнала “ошибки”  $\Delta U$  (разности амплитуд гармоник тестового сигнала) с погрешностью настройки  $\delta f$

$$\Delta U(\delta f) = -\frac{4U_1 K(f_0)}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta f}{\Delta f_k}, \quad (3)$$

где  $2\Delta f_k$  - полоса пропускания ВТСП контура,  $U_1$  – амплитуда гармоники тестового сигнала,  $K(f_0)$  - коэффициент передачи фильтра на центральной частоте. В частности, задаваясь значением коэффициента передачи на центральной частоте  $K(f_0) = 0.5$ , требуемой неточностью настройки  $\delta f = 1$  Гц, минимальной полосой контура  $2\Delta f_k = 300$  Гц, из (3) получаем требуемую чувствительность приемника тестового сигнала

$$|\Delta U| = 2.566 \cdot 10^{-3} \cdot U_1. \quad (4)$$

Показано, что погрешность настройки фильтра  $\delta f$  из-за наличия погрешностей других блоков (ширины зоны нечувствительности приемника тестового сигнала  $\Delta U_{\text{нчс}}$ , неточности установки амплитуд  $\delta U$ , погрешностей частот сигналов входящих в состав блока ФЧРК ( $\delta f_{215}$ ,  $\delta f_5$ ,  $\delta f_{30}$  – отклонения частот генераторов 215 кГц, 5 МГц, 30 МГц, входящих в состав ФЧРК от номинальных значений,  $\delta f_{\text{н.рпу}}$  – отклонение частоты гетеродина радиоприемного устройства)) имеет вид

$$\delta f = \frac{2.11 \cdot \delta U \cdot \Delta f_k}{U_{10}} - \frac{\Delta U_{\text{нчс}} \cdot \Delta f_k}{0.772 \cdot U_{10} \cdot K(f_0)} + \delta f_{\text{н.рпу}} - \delta f_5 + \delta f_{215} - \delta f_{30}. \quad (5)$$

В диссертации проведен анализ влияния каждого из параметров, входящих в (5) на погрешность настройки и их совокупности. Полученные

данные использовались при построении блоков системы управления, использующей амплитудно-разностный метод настройки.

В главе проведена оценка важнейшего параметра системы управления – времени, необходимого на перестройку ВТСП фильтра с начальной частоты на частоту рабочего канала, заданную оператором. Общее время настройки ВТСП фильтра  $t_{\Sigma}$  определяется соотношением

$$t_{\Sigma} = t_{опред} + t_{гр.настр} + t_{точ.настр} + t_{перех.процесс}, \quad (6)$$

где  $t_{ОПРЕД}$  - время определения исходной (начальной) частоты ВТСП фильтра,  $t_{ГР.НАСТР.}$  - время грубой настройки,  $t_{ТОЧ.НАСТР.}$  - время точной настройки,  $t_{ПЕРЕХ.ПРОЦЕСС}$  - время переходных процессов (рисунок 9).

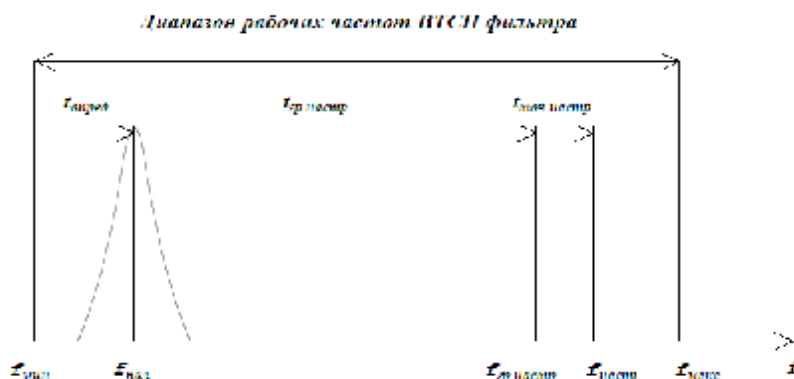


Рисунок 9 – Основные составляющие общего времени настройки ВТСП фильтра на заданную частоту.

Установлено, что время определения исходной (начальной) частоты ВТСП фильтра  $t_{ОПРЕД}$  в случае использования амплитудного метода составляет порядка 18 сек. При использовании модификации этого метода, использующего блок памяти ранее введенной частоты, это время сокращается до 2 сек. Время грубой настройки  $t_{ГР.НАСТР.}$ , определяется тремя

параметрами: частотой шага пьезодвигателя -  $f_{ш}$ , частотным интервалом перестройки -  $\Delta F$  и величина перемещения по частоте за 1 шаг -  $\delta f$

$$t_{зр.настр} = \frac{\Delta F}{\delta f_{ш} \cdot f_{ш}} \quad (7)$$

Время точной настройки  $t_{ТОЧ.НАСТР.}$  определяется временем инерционных процессов в пьезодвигателе  $t_{ИН}$  и временем отработки системой управления сигнала ошибки настройки  $t_{ОШ}$ . В низкочастотной части диапазона (менее 16 МГц) время инерционных процессов может достигать 30 сек. С учетом всех факторов в таблице приведено расчетное время настройки для двух частот  $f_{ш}$  в шаговом режиме – 50 и 100 Гц при учете минимальных и максимальных затрат времени на инерционные процессы в пьезодвигателе и на этапе точной настройки.

Общее время настройки для нескольких частотных участков.

Диапазон перестройки $\Delta F$ , МГц	Максимальное общее время настройки (при частоте шага 50 Гц) $t_{\Sigma}$ , с	Минимальное общее время настройки (при частоте шага 50 Гц) $t_{\Sigma}$ , с	Максимальное общее время настройки (при частоте шага 100 Гц) $t_{\Sigma}$ , с	Минимальное общее время настройки (при частоте шага 100 Гц) $t_{\Sigma}$ , с
8 – 12	48.26	9.36	47.63	8.73
12 – 16	50	11.1	48.5	9.6
16 – 20	53	14.1	50	11.1
20 – 24	31	27.1	42	10.1
24 – 28	49	35.1	33	19.1
28 - 32	75	61.1	46	32.1

**Пятая глава** содержит описание структурных схем и результаты лабораторных исследований систем управления, построенных исходя из требований и алгоритмов, сформулированных в предыдущих главах.

Были разработаны три системы управления, реализующие амплитудный и амплитудно-разностный методы настройки. В результате исследований установлено, что средняя относительная неточность настройки составила 33.2% от полосы пропускания. Максимальная неточность составила 970 Гц, при частоте ВТСП фильтра 24.5 МГц и полосе пропускания 2300 Гц. Среднее время настройки составило 61 сек.

В процессе испытаний установлено, что амплитудно-разностный метод точной настройки обеспечивает среднюю относительную (относительно полосы пропускания фильтра) неточность настройки 6.41%, максимальная ошибка составила 80 Гц при центральной частоте ВТСП фильтра 24 МГц и полосе пропускания 750 Гц. Среднее время настройки в пределах рабочего диапазона составило 30.4 сек. Однако используемый автогенераторный метод определения начальной частоты ненадежен и при работе давал сбои.

По результатам испытаний двух вышеописанных систем была предложена и реализована схема цифровой системы управления, в основу которой заложен модифицированный амплитудный метод поиска начальной частоты ВТСП фильтра, запоминающий предыдущую частоту рабочего канала, используемый на этапе определения начальной частоты фильтра на этапе грубой настройки и амплитудно-разностный метод на этапе точной настройки. В результате лабораторных испытаний выявлено, что средняя относительная неточность настройки составила 8.39%. Максимальная ошибка составила 140 Гц на частоте ВТСП фильтра 16 МГц и полосе пропускания 830 Гц. Среднее время настройки – 38.5 сек. Цифровая система управления выигрывает по времени и точности настройки у системы с амплитудным методом и выигрывает по надежности и удобству эксплуатации - у аналоговой системы, использующей в режиме точной

настройки тот же амплитудно-разностный метод. При этом время и точность настройки у этих систем одного порядка.

**Шестая глава** посвящена результатам сопряжения и испытаний цифровой системы управления с ВТСП фильтром и РПУ типа “Катран” на объекте Заказчика (рисунок 10). В главе приводятся результаты испытаний и акт приемки работ, в котором подтверждены требуемые характеристики настройки и управления ВТСП фильтром в КВ диапазоне и высокая эффективность использования ВТСП фильтра совместно с системой управления для улучшения характеристик РПУ при работе в реальной помеховой обстановке. В частности, объединенная система ВТСП преселектора + система управления + радиоприемное устройство обеспечила требуемую настройку ВТСП преселектора по частоте приемника (не хуже 10 % от полосы пропускания преселектора).



Рисунок 10 - Фотография испытательного стенда системы преселектор + система управления + РПУ.

**В приложении** приводятся принципиальные электрические схемы разработанных систем управления перестраиваемым ВТСП фильтром.



### ***Заключение:***

1. В настоящее время разработан ряд перестраиваемых ВТСП фильтров, перекрывающих весь КВ диапазон, с характеристиками, недостижимыми при использовании традиционных технологий. Эти фильтры могут найти широкое применение как для преселекции сигнала (для повышения эффективности приемных устройств КВ диапазона), так и для согласования и настройки электрически малых вибраторных антенн КВ диапазона. Но, для эффективного использования всех достоинств этого фильтра необходима высокоточная система настройки, стабилизации и перестройки, осуществляющая управление таким фильтром в диапазоне частот от 1 до 30 МГц с точностью настройки порядка нескольких десятков герц.

2. На основе анализа существующих способов управления параметрами ВТСП фильтров установлено, что наиболее приемлемым для практического применения на данном этапе развития технологии является электромеханический способ управления частотой (и полосой) настройки ВТСП фильтра с помощью пьезодвигателя, расположенного в среде жидкого азота.

3. Предложены, обоснованы и исследованы несколько вариантов и способов построения высокоточной системы настройки, перестройки и стабилизации параметров ВТСП фильтров с электромеханической настройкой частоты.

4. Разработаны алгоритмы настройки, стабилизации и перестройки параметров узкополосного (с полосой 300 – 3000 Гц) ВТСП фильтра, позволяющие детализировать схемы управления параметрами ВТСП фильтра и улучшить точностные и временные параметры настройки.

5. По результатам проведенного теоретического и экспериментального исследований точностных и временных характеристик настройки обоснованы требования к характеристикам отдельных блоков и узлов системы настройки в разных вариантах их построения.

6. Спроектированные с использованием результатов теоретического и экспериментального исследования макеты аналоговой и цифровой системы управления позволили осуществить точность настройки ВТСП фильтра в несколько десятков герц на произвольную частоту КВ диапазона, что эквивалентно точности позиционирования деталей ВТСП фильтра порядка  $10^{-3} - 10^{-2}$  мкм, с максимальным временем перестройки 40 – 100 сек.

7. Разработанный макет цифровой системы управления, был сопряжен с ВТСП преселектором, радиоприемным устройством КВ диапазона и проведены испытания эффективности всей системы в виде ВТСП преселектора, системы управления и приемного устройства на объекте Заказчика, получившие высокую оценку Заказчика. В конечном итоге удалось улучшить характеристики радиоприемного устройства по чувствительности на 3 дБ, по избирательности не менее 20 дБ при отстройке на 10 кГц от частоты настройки, по динамическому диапазону 3-го порядка на 17 дБ при отстройке ближайшей помехи на 30 кГц.

***Публикации автора по теме диссертации:***

1. Пономарев Л.И., Жуков А.С., Терёхин О.В., Соловьев Г.В., Прокопьев Т.В., Плесков В.В. Анализ возможности реализации ВТСП фильтров ВЧ диапазона и исследование их характеристик // Интернет-конференция «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», 2003.
2. Прокопьев Т.В., Плесков В.В. – Система управления перестраиваемым высокочастотным ВТСП фильтром. Тезисы докладов в сборнике научных трудов XII военно-научной конференции “Развитие теории и практики строительства и применения войсковой ПВО в системе вооруженной борьбы ВС РФ”, 2004.
3. Прокопьев Т.В. – Высокоточная система настройки и перестройки сверхузкополосного ВТСП фильтра. Тезисы докладов в сборнике научных трудов Всероссийской научно-технической конференции “Информационно - телекоммуникационные технологии”, 2004.

4. Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В. – Система управления в широкой полосе частот сверхузкополосным ВТСП фильтром. Тезисы докладов в сборнике научных трудов III Международной научно – технической конференции “Физика и технические приложения волновых процессов”, 2004.
5. Прокопьев Т.В., Плесков В.В. – Перестраиваемый сверхузкополосный ВТСП фильтр с высокоточной системой управления. Тезисы докладов на Научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, лауреата Государственной премии СССР, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Михаила Самойловича Неймана, 2005.
6. Прокопьев Т.В. – Определение параметров перестраиваемого высокочастотного ВТСП контура. Тезисы докладов в сборнике научных трудов IV Международной научно – технической конференции “Физика и технические приложения волновых процессов”, 2005.
7. Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В. – Управляемый высокочастотный ВТСП фильтр. Тезисы докладов в сборнике научных трудов IV Международной научно – технической конференции “Физика и технические приложения волновых процессов”, 2005.
8. Прокопьев Т.В. – Сверхузкополосный ВТСП фильтр перестраиваемый высокоточной системой управления. Тезисы докладов в сборнике научных трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием “VIII Королевские чтения”, 2005.
9. Паршиков В.В., Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В. – Управляемый высокочастотный фильтр, построенный на использовании высокотемпературной сверхпроводимости. Антенны, выпуск 12 (103), 2005.
10. Плесков В.В., Прокопьев Т.В., Иванов Е.Н. – Оценка точности настройки высокочастотного ВТСП фильтра. Антенны, выпуск 12 (103), 2005.
11. Прокопьев Т.В. – Определение параметров перестраиваемого высокочастотного ВТСП-фильтра на эффекте высокотемпературной сверхпроводимости. Антенны, выпуск 12 (103), 2005.
12. Паршиков В.В., Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В., Терехин О.В. Использование ВТСП фильтров для настройки и перестройки электрически малых антенн.

Тезисы докладов в сборнике научных трудов VI Международной научно – технической конференции “Физика и технические приложения волновых процессов”, 2007.

13. Паршиков В.В., Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В., Терехин О.В. Использование высокочастотного ВТСП контура для настройки малогабаритных антенн. Тезисы докладов в сборнике научных трудов XIV Международной научно – технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, 2008.
14. Паршиков В.В., Прокопьев Т.В. Высокоточная система настройки и управления высокочастотным ВТСП преселектором КВ диапазона. Тезисы докладов в сборнике научных трудов XIV Международной научно – технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, 2008.
15. Паршиков В.В., Пономарев Л.И., Прокопьев Т.В., Терехин О.В. Устройство для автоматической настройки высокочастотного контура высокочастотного диапазона радиоприемника, Патент 53502, заявка №2005125960. Приоритет от 16.08.2005г.
16. Пономарев Л.И., Скородумов А.И., Паршиков В.В., Прокопьев Т.В. Терехин О.В. Перестраиваемая малогабаритная высокотемпературная сверхпроводящая антенна. Заявка на патент. Дата заявки: 19.07.2007г., входящий номер 029941, регистрационный номер 2007127494.

***Публикации других авторов:***

17. Высокочастотный контур высокочастотного диапазона / Л.И. Пономарев, А.Ю. Ганицев, А.С. Жуков, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, В.В. Владимиров, А.Г. Летяго, В.В. Паршиков // Патент на изобретение № 2170489 от 10 июля 2001г.
18. Диссертация Жукова А.С. Перестраиваемый узкополосный преселектор ВЧ диапазона. М., МАИ, 2003.
19. Диссертация Баринова А.Э. Исследование резонансных сверхпроводящих структур с сосредоточенными элементами для устройств СВЧ-электроники. М., МЭИ, 2001.
20. Active tuning of high frequency resonators and filters, Hui Xu, Erzhen Gao, Q.Y.Ma, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, vol.11, no.1, pp. 353-356.