

*На правах рукописи*



**ЛЯШУК АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СТАБИЛЬНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
УДАРОСТОЙКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВЫХ ПАВ  
КОМПОНЕНТОВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Омск 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ) на кафедре «Радиотехнические устройства и системы диагностики»

**Научный руководитель:** Завьялов Сергей Анатольевич,  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Шакин Олег Васильевич,  
доктор технических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Яковлев Андрей Николаевич,  
кандидат технических наук,  
ОАО «ОНИИП»

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество «Центральное конструкторское бюро автоматики»

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.178.01 при Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г.Омск, пр. Мира, 11, ауд. 8-421.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте ОмГТУ <http://www.omgtu.ru/>.

Автореферат разослан «18» ноября 2014 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 644050, Омск-50, пр.Мира, 11, Омский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д212.178.01.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.178.01  
доктор технических наук, профессор



В.Л. Хазан

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Создание высокочастотного генератора (с рабочими частотами 150 МГц и выше), обладающего в комплексе относительно высокими техническими характеристиками, такими, как способность генератора выдерживать высокие ударные нагрузки, порядка десятков тысяч  $g$  ( $g$  – ускорение свободного падения), высокая температурная стабильность частоты выходного сигнала, обеспечение перестройки по частоте в широких пределах, относительно небольшое энергопотребление, малые габариты и малое время включения, – является актуальной научно-технической и конструкторско-технической задачей. Актуальность подтверждается большой востребованностью такого класса изделий, в частности, в военной технике.

Одной из проблемной составляющей при синтезе стабильного ударостойкого высокочастотного генератора с малыми массогабаритными параметрами является выбор частото задающей системы автогенератора, являющейся наиболее критичным узлом автогенератора. Частото задающий элемент автогенератора определяет во многом научно-технические и конструкторско-технические задачи, которые необходимо исследовать и решить при проектировании генератора.

Вопросы построения высокочастотных генераторов на ПАВ линиях задержках, ПАВ резонаторах, в частности, генераторов с высокой температурной стабильностью, отражены во многих работах, в частности, А.А. Дворникова, В.И. Огурцова, Г.М. Уткина, Т. Е. Паркера, И. Зеленки, Г. Мэттьюза, А.С. Доберштейна. В этих трудах и работах других авторов, в частности, Смитта, Хартманна, Слободника (мл.), Тоболки, отражены вопросы анализа свойств основных элементов ПАВ устройства – встречно-штыревого преобразователя, отражательной решетки, многополоскового ответвителя. Менее подробно в литературе освещены вопросы проектирования высокочастотных ударостойких генераторов; отдельные проблемы обеспечения высокой ударостойкости и вибростойкости генераторов освещены в работах Грегори, Джэйхеда, Смитта, Гринштайна, Липелеса.

В публикациях И.П. Норенкова, Т. Адачи, А.В. Косых, А.Н. Лепетаева, А.А. Губарева, и др. широко отображены число-аналитические методы анализа генераторов, преимущественно, кварцевых. Наиболее точные результаты моделирования и расчета дают современные программы схемотехнического моделирования, основанные на SPICE-моделях компонентов.

Анализ литературных источников, российских и зарубежных научных периодических изданий и патентных баз показывает недостаточную проработку научной составляющей в области проектирования и моделирования генераторов на ПАВ с широкой перестройкой по частоте.

Исследования по теме диссертации проводились в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы. Научные и практические результаты диссертационной работы использованы ФКП «Нижнетагильский институт испытания металлов» в ходе выполнения работ по ряду НИОКР на проведение

исследования по созданию передающего устройства фазоманипулированных сигналов с высокой G-стойкостью.

### **Цель диссертационной работы.**

Исследование и разработка стабильных высокочастотных широкоперестраиваемых ударостойких ПАВ генераторов на основе фильтровых ПАВ компонентов.

Для достижения поставленной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи.

1. Выполнен анализ электрических свойств ПАВ компонентов (ПАВ резонаторов, ПАВ линий задержек, ПАВ фильтров).

2. Разработана модель пассивной части автогенератора на ПАВ фильтре для исследования в распространенных программах компьютерного моделирования.

3. Предложен способ анализа пассивной части автогенератора на ПАВ фильтре с малыми потерями для создания автогенератора, выполненного по трехточечной схеме.

4. Выполнено численное исследование механических напряжений в пьезопластине ниобата лития, возникающих при статических ускорениях.

5. Проанализированы способы и особенности построения высокочастотных ударостойких генераторов.

6. Обоснована применимость кусочно-линейной интерполяции для построения синтезатора компенсирующей функции генератора на ПАВ фильтре, практически разработана система температурной компенсации автогенератора.

### **Методы исследований.**

1. Положения теории линейных электрических цепей для исследования параметров четырехполюсника путем анализа его волновой матрицы.

2. Методы компьютерного моделирования электронных схем в широко распространенных программах моделирования.

3. Метод двухполюсного представления автогенератора.

4. Методы тензорной алгебры для расчета механических напряжений и деформаций в упругом твердом теле при статических нагрузках.

5. Экспериментальные методы исследований.

### **Научная новизна.**

В процессе исследований получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана модель пассивной части автогенератора на четырехполюсном фильтровом ПАВ компоненте с малыми потерями, отличительной особенностью которой является использование одной пары входов четырехполюсника для управления комплексным импедансом с индуктивным характером, а другой пары входов - для подключения к схеме автогенератора.

2. Развита численно-аналитический метод моделирования автогенераторов, что позволило расширить возможности метода для создания высокочастотных перестраиваемых по частоте автогенераторов на ПАВ фильтрах.

3. Созданы схемы автогенератора, управляемого напряжением, с фильтром на ПАВ с широкой перестройкой по частоте и генератора на ПАВ фильтре с улучшенной температурной стабильностью.

### **На защиту выносятся.**

1. Алгоритм моделирования автогенератора с пассивной частью, выполненной с использованием фильтровых ПАВ компонентов в программе моделирования общего назначения.

2. Теоретические и практические результаты исследования стабильного высокочастотного ударостойкого генератора на ПАВ фильтре с широкой перестройкой по частоте, выполненного по схеме Колпитца.

3. Технические решения генератора на ПАВ фильтре, защищенные патентами.

### **Практическая ценность работы заключается в следующем.**

1. Разработанный способ анализа и проектирования автогенератора на ПАВ фильтре с применением распространенных программ компьютерного моделирования позволяет уменьшить трудозатраты на выполнение разработки и схемной оптимизации автогенератора на ПАВ фильтре.

2. Разработанная и защищенная патентом новая схема автогенератора на ПАВ фильтре позволяет создать малогабаритный стабильный ударостойкий генератор с широкой перестройкой по частоте.

3. Разработанный математический аппарат для расчета механических напряжений в конструкции ПАВ фильтра позволяет уменьшить трудозатраты на проектирование ударостойкой конструкции автогенератора.

### **Апробация работы.**

Основные положения, изложенные в диссертационной работе, представлены и обсуждены:

– на XV Международной научной конференции для молодых ученых «Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах» (Санкт-Петербург, 2012 г.).

– на Всероссийской научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной 15-летию ИРСИД (ОмГТУ, 2012 г.);

– на V Межрегиональной научно-практической конференции «Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, модернизация, эксплуатация, боевая эффективность, наука и образование «Броня-2010», проходившей в рамках подготовки к IX Международной выставке высокотехнологичной техники и вооружения «ВТТВ-Омск-2011»;

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 3 статьи в научных изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, 3 патента на полезную модель.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из 4 глав, введения, заключения, списка литературы из 158 источников, 3 приложений и содержит 146 страниц основного текста, 92 рисунка, 3 таблицы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проводимых в диссертационной работе исследований, сформулированы цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор способов построения высокочастотных автогенераторов с позиции одновременной реализации высокой ударостойкости, температурной стабильности, малого времени включения, широкой перестройки по частоте, простоты способов проектирования и анализа параметров автогенератора с последующей практической реализацией.

Исследование публикаций показало, что в источниках опорных колебаний в диапазоне частот (100...300) МГц, обладающей высокой G-стойкостью, используют LC автогенераторы, автогенераторы на ПАВ структурах, кварцевых и МЭМС резонаторах (рисунок 1).

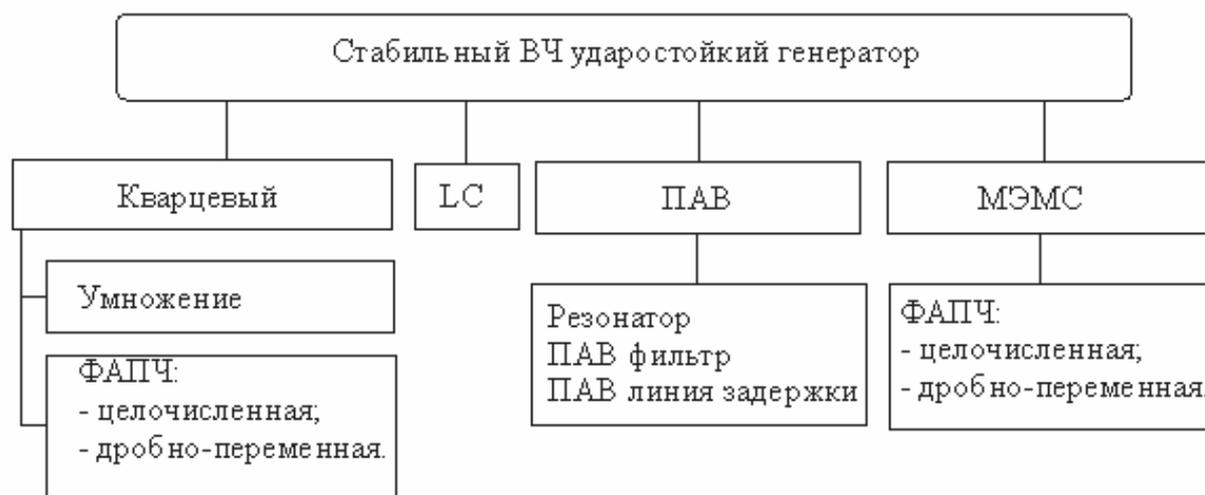


Рисунок 1 – Классификация стабильных высокочастотных ударостойких генераторов

Основные достоинства использования LC генераторов – возможность их изготовления по гибридной технологии, удовлетворяющей требованиям G-стойкости, малые габариты и при использовании современных компонентов для поверхностного монтажа, G-стойкость и доступность. Их основной недостаток – невысокая температурная стабильность и непрогнозируемость поведения при старении элементов.

Более высокие характеристики стабильности могут быть достигнуты на основе использования в качестве частотоподающих элементов кварцевых резонаторов (КР), МЭМС резонаторов, ПАВ структур.

Традиционным широко развитым направлением в теории генерирования являются кварцевые генераторы. Основным недостатком их использования в ударостойких применениях заключается в сложности обеспечения ударной

стойкости, так как пьезоэлемент представляет собой свободно висящую пластину, закрепленную только по краям. Еще одно ограничение использования кварцевых автогенераторов – ограничение частотного диапазона десятками мегагерц. Использование последующего умножения частоты КГ петлей ФАПЧ или путем прямого умножения частоты выходного сигнала сильно усложняет устройство, снижает надежность за счет увеличения числа компонентов, увеличиваются массогабаритные параметры и энергопотребление устройства в целом.

Анализ показал, что относительно новым направлением в теории генерирования является использование в качестве частотно-задающего элемента резонаторов, изготовленных на основе микроэлектромеханических технологий. Главное достоинство МЭМС-устройств - это возможность их изготовления на кремниевой подложке с помощью технологии микрообработки, аналогично технологии изготовления однокристалльных интегральных микросхем. С точки зрения ударостойких применений это свойство выгодно отличает МЭМС генератор от других классов генераторов - известно, что сила  $F$ , как следует из второго закона Ньютона, пропорциональна массе  $m$  и ускорению  $a$ :  $F=m \times a$ , поэтому в МЭМС резонаторах проблема фиксации или крепления пьезоэлектрической пластины (как самого чувствительного к механическим нагрузкам элемента) отсутствует как таковая. Основные недостатки МЭМС резонатора – это относительно низкая температурная стабильность частоты генератора на основе МЭМС резонатора, обусловленной линейной зависимостью модуля Юнга для кремния от температуры, ограничение по частоте резонансной частоты десятками мегагерц серийно выпускаемых МЭМС резонаторов, технологическая сложность при проектировании и изготовлении высокочастотных генераторов на основе МЭМС резонаторов.

Показано, что в настоящее время требуемую комбинацию параметров целесообразно получить на основе использования ПАВ структур.

Достоинствами автогенераторов на ПАВ являются малые габариты, малая масса и меньшая чувствительность к вибрациям, чем у кварцевых генераторов, а также то, что частота колебаний без умножения лежит в диапазоне от 10 МГц до нескольких ГГц. В качестве недостатков следует отметить: более низкую добротность в пределах (100...10000) раз, более худшую температурную стабильность до 1000 ppm в диапазоне (-40 ...+85)°С. Основная предпосылка для использования в ударостойких применениях – возможность реализации высокой G-стойкости, так как конструктивно ПАВ-фильтр или резонатор выполнен в виде монолитной плоской структуры, где пьезоэлектрик, на котором нанесен встречно-штыревой преобразователь ПАВ-фильтра, по всей своей площади жестко приклеен к основанию-корпусу, в котором находится ПАВ-фильтр. Кроме того, номенклатура отечественных предприятий, выпускающих ПАВ-фильтры, достаточно широка, технология изготовления ПАВ-фильтров хорошо освоена.

Анализ общеизвестных решений автогенераторов на ПАВ показал, что широкополосные фильтровые ПАВ компоненты с малыми потерями в относительно простых однокаскадных схемах, выполненных по трехточечной схеме, не используются.

На основе проведенного анализа с целью обосновать гипотезу целесообразности использования широкополосного ПАВ компонента в трехточечной схеме автогенератора необходимо решить следующие задачи:

– обосновать требования к электрическим свойствам ПАВ компонента для проектирования ПАВ ГУН с широкой перестройкой по частоте;

– разработать модель пассивной части автогенератора на ПАВ компоненте для анализа и проектирования автогенератора, выполненного по трехточечной схеме.

**Вторая глава** посвящена исследованию пассивной части автогенератора на ПАВ. Выполнена проверка гипотезы о возможности использования ПАВ фильтра с низкими потерями для реализации индуктивной реакции, необходимой для выполнения условия баланса фаз и амплитуд в трехточечной схеме, а также предложен алгоритм моделирования высокочастотного автогенератора на ПАВ фильтре. Произведена оценка перестройки по частоте автогенератора на ПАВ фильтре.

Согласно методу двухполюсного представления автогенератор можно представить в виде соединения двух двухполюсников, которые отображают активную и пассивную части автогенератора (рисунок 2).

В процессе генерирования энергетические потери в пассивной части полностью компенсируются, если сумма реальных частей входных сопротивлений отрицательна. Начальными условиями возбуждения колебаний являются:

$$\left| R_{act} \right| > \left| R_{pas} \right|,$$

$$\text{sgn}(R_{act}) = -\text{sgn}(R_{pas})$$

С увеличением амплитуды сигнала коэффициент усиления транзистора уменьшается. В момент, когда сумма реальных частей входных сопротивлений становится равной нулю, происходит установление режима работы генератора со следующими условиями:

$$\left| R_{act} \right| = \left| R_{pas} \right|,$$

$$X_{pas} = -X_{act}$$

Наступает так называемый баланс энергий, соответствующий стационарному режиму генерации.

ПАВ фильтр изначально является четырехполюсником, но с точки зрения включения его в схему автогенератора, выполненного по трехточечной схеме, представляет собой эквивалентный двухполюсник (рисунок 3) с индуктивным характером входного импеданса.

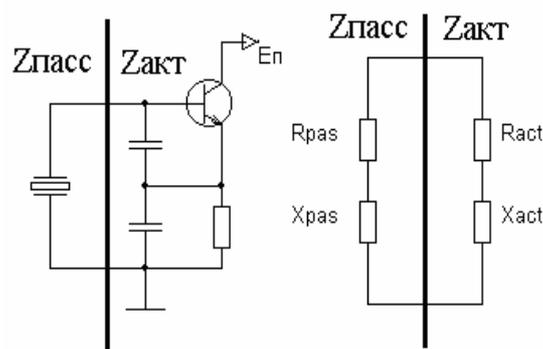


Рисунок 2 – Двухполюсное представление автогенератора



Рисунок 3 – Преобразование четырехполюсного ПАВ компонента в эквивалентный управляемый двухполюсник

Для проверки гипотезы о возможности использования ПАВ фильтра с низкими потерями для реализации индуктивной реакции, необходимой для выполнения условия баланса фаз и амплитуд в трехточечной схеме, разработана модель (рисунок 4) пассивной части автогенератора. В модели ПАВ фильтр представляется с использованием обобщенной эквивалентной схемы (ОЭС) пьезоэлектрического преобразователя (ПП). Основными элементами акустического тракта устройств на ПАВ являются входной и выходной преобразователи и пьезоэлектрический звукопровод (подложка) между ними. Характеристика устройства на ПАВ формируются за счет частотно-зависимого преобразования электрического сигнала в акустическую волну входным преобразователем и акустической волны в электрический сигнал выходным преобразователем. Для моделирования каждый преобразователь отображен десятью парами электродов, каждая из которых моделировалась ячейкой Мэсона на отрезках длинных линий.

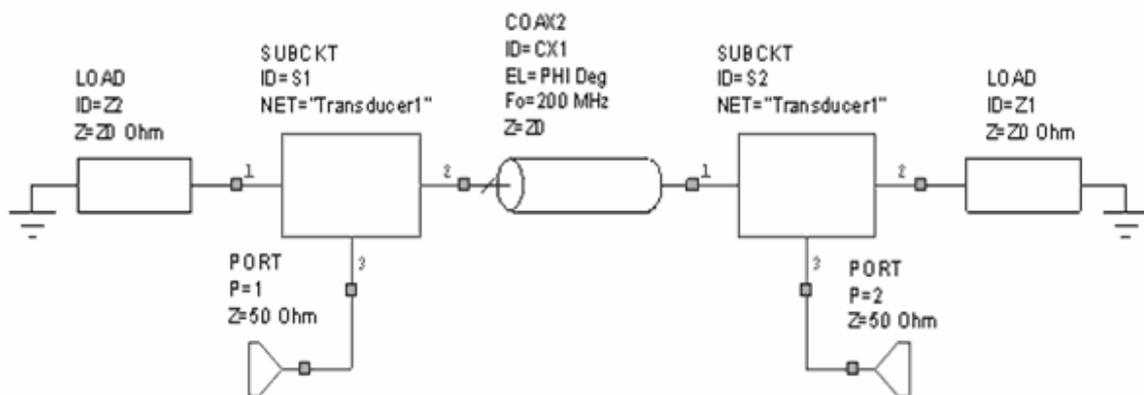


Рисунок 4 – Модель ПАВ фильтра на отрезках длинных линий

Моделирование показало, что при формировании режима короткого замыкания по одному из портов, либо режима холостого хода (рисунок 4, порты 1 и 2 равнозначны) характер реализуемой реакции имеет требуемый индуктивный характер.

С целью обеспечить изменение индуктивной реакции на одном из выходов (рисунок 5, порт 2) сформирована нагрузка с изменяемой реактивностью (изменение емкости контура  $C1$ , рисунок 5). На рисунках 6 и 7 на графиках изменения активной и реактивной составляющих входного импеданса схематично отмечена область, которая представляет интерес при реализации автогенератора Колпитца.

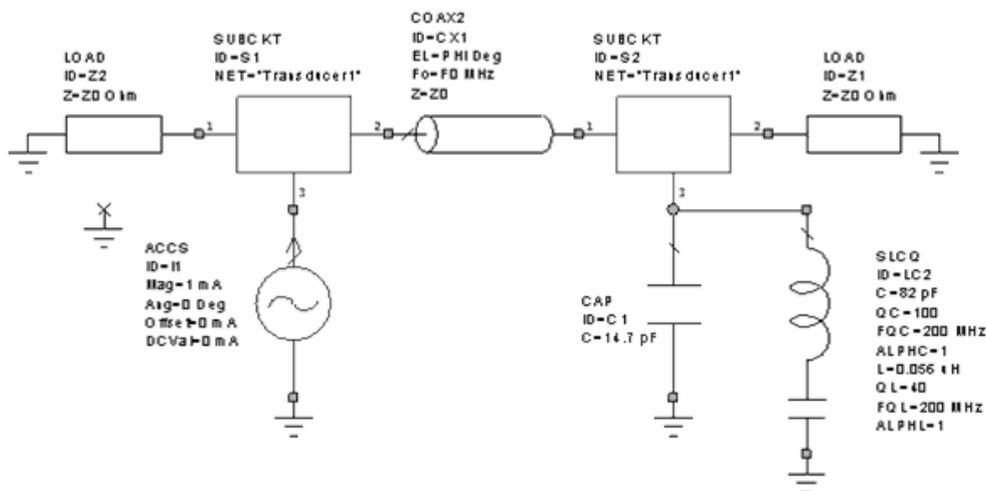


Рисунок 5 – Модель ПАВ фильтра на отрезках длинных линий с управляющим контуром

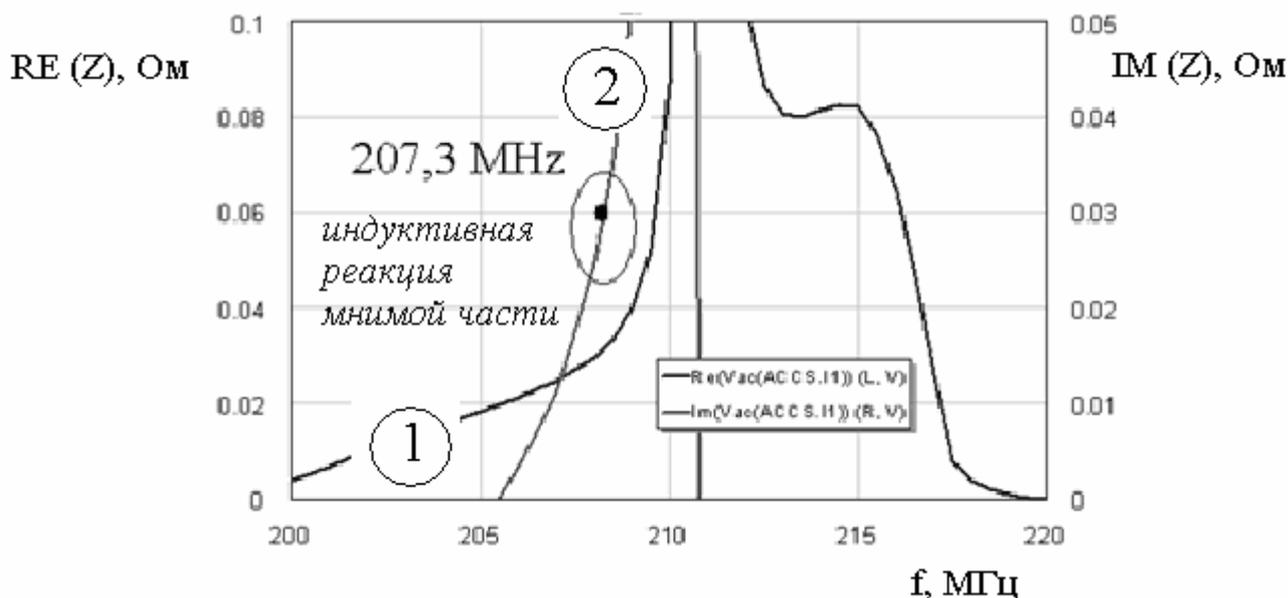


Рисунок 6 – Реальная (1) и мнимая (2) части входного импеданса при малой величине емкости в контуре с индуктивной реакцией мнимой части

Анализ модели показал, что перестройка по частоте зависит от характеристик пьезоэлектрика, из которого выполнен звукопровод ПАВ фильтра и особенностей встречно-штыревого преобразователя (числа пар электродов, их апподизации).

С учетом связи между относительной шириной полосы пропускания  $\Delta f/f$  и оптимальным количеством пар электродов встречно-штыревого преобразователя  $N_0$  можно записать:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{N_0} = \sqrt{\frac{4 \times k^2 c v}{\pi}} = 1.128 \times k c v$$

где  $k^2 c v$  - коэффициент электромеханической связи.

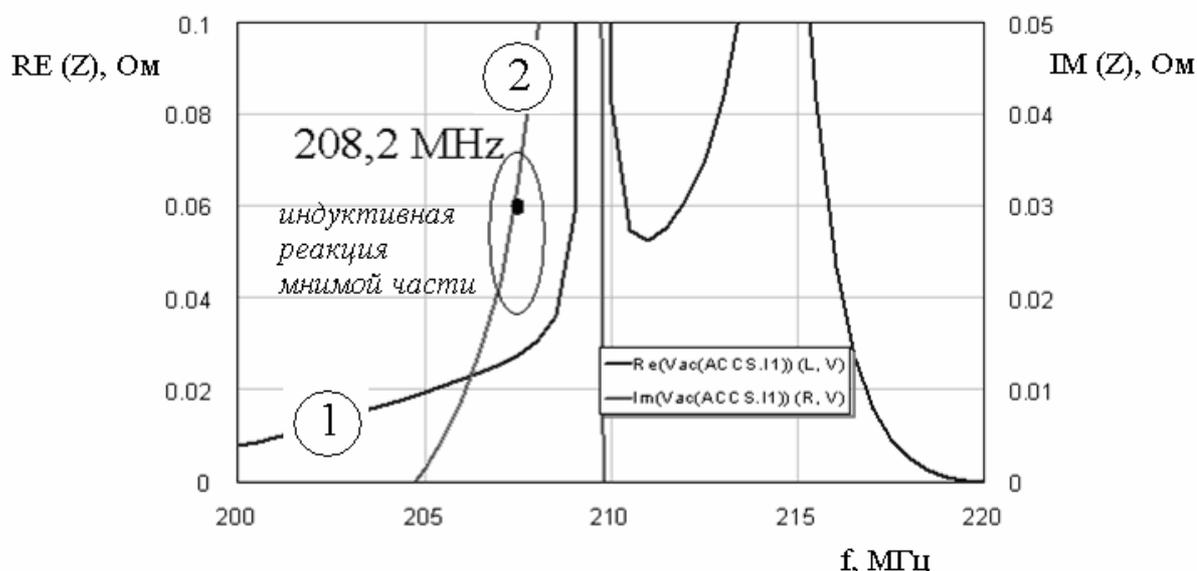


Рисунок 7 – Реальная (1) и мнимая (2) части входного импеданса при большой величине емкости в контуре с индуктивной реакцией мнимой части

Значения  $k^2_{св}$  сильно отличаются для разных материалов: для ниобата лития  $k^2_{св}$  составляет примерно 0.05, для танталата лития Z и Y ориентации – 0.01, а для кварца – 0.002. Оценивая потери в ПАВ структуре, следует отметить, что использование пьезокристаллов ниобата лития, германата висмута и пьезокварца позволяет создавать ПАВ устройства с небольшими вносимыми потерями. Поэтому, с точки зрения создания широкополосных ПАВ устройств с малыми потерями, наиболее предпочтительным материалом для звукопровода является ниобат лития. (класс ПАВ фильтров для входных цепей радиоприемного тракта, технология производства которых хорошо освоена).

Для моделирования схемы автогенератора с пассивной частью, выполненной с использованием фильтровых ПАВ компонентов, предложен алгоритм на рисунке 8.

Для анализа характера входного импеданса  $Z_{пасс}$  линейной части автогенератора удобно воспользоваться элементами волновой теории, представив ПАВ фильтр через волновую матрицу рассеяния (S-параметры). Для моделирования свойств автогенератора используются распространенные программы САПР.

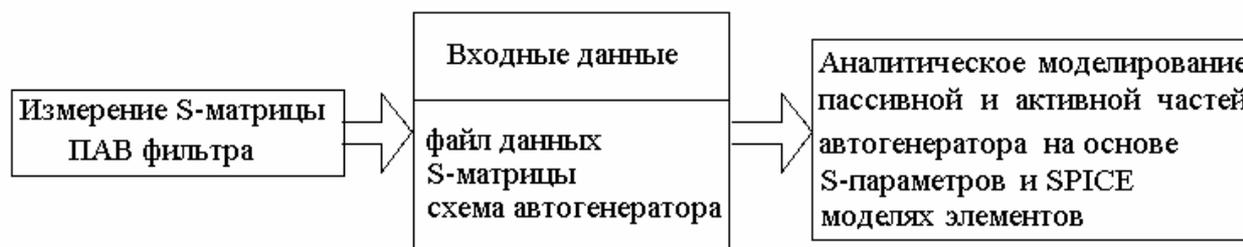


Рисунок 8 – Алгоритм моделирования автогенератора с пассивной частью, выполненной с использованием фильтровых ПАВ компонентов

Известно, что для любой цепи коэффициенты рассеяния с одинаковыми индексами  $S_{ij} = \Gamma_j = \frac{(Z_{вв})_j - R_j}{(Z_{вв})_j + R_j}$ , являются коэффициентами отражения от  $j$ -го плеча, то есть коэффициентами отражения между входным сопротивлением  $(Z_{вв})_j$   $j$ -го плеча и подключенной к нему нагрузкой  $R_j$ ,  $\Gamma_j$  - коэффициент отражения. Из выражения для коэффициентов рассеяния можно получить формулу для входного импеданса через коэффициент отражения по входу или коэффициент  $S_{11}$ :  $Z_{вв} = R_1 \times \frac{1 + \Gamma_1}{1 - \Gamma_1} = R_1 \times \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$ . В выражении для входного импеданса  $R_1$  - это системный импеданс, как правило, равный 50 Ом; величины  $Z_{вв}, \Gamma_1$  являются комплексными; S-параметры – измеренные величины, используемые как входные данные для анализа пассивной части автогенератора на ПАВ фильтре. Таким образом, выполняется переход на макро-уровень моделирования пассивной части и, соответственно, автогенератора и имеется возможность формировать общие требования к параметрам ПАВ фильтра, таким, как вносимое затухание, полоса пропускания, линейность фазовой характеристики. Такой подход удобен тем, что нет привязки к конкретной структуре и способам, которыми реализован ПАВ фильтр с малыми потерями. Необходимо отметить, что пассивную часть на ПАВ фильтре можно исследовать методами классической теории линейных цепей (законы Киргофа, электромеханические аналогии, теория многополюсников). Однако представление ПАВ фильтра (как основного элемента пассивной части автогенератора) на основе одной из эквивалентной схем (микро-уровень моделирования) диктует необходимость для каждой конкретной структуры ПАВ фильтра производить модификацию его эквивалентной схемы с учетом индивидуальных особенностей (например, кольцевой, резонаторной, повторяющейся структуры, с учетом апподизации систем электродов).

Преимущество использования S-параметров для анализа и расчета именно высокочастотных схем также заключается в том, что они позволяют учесть в процессе расчетов паразитные обратные связи, направления и места утечки высокочастотного (ВЧ) сигнала, особенности топологии печатной платы и места размещения ВЧ устройства для более точного проектирование автогенератора средствами компьютерного моделирования.

Для практического моделирования перестраиваемой пассивной части был использован ПАВ фильтр с электрическими характеристиками в таблице 1; входные данные для моделирования – предварительно измеренные S-параметры ПАВ фильтра, схема включения ПАВ фильтра показана на рисунке 9.

Таблица 1

Центральная частота, $f_0$ , МГц	Полоса @-3дБ, МГц	Потери дБ	Пульсации дБ	Подавление* дБ	ТКЧ $10^{-6} / ^\circ\text{C}$
203,85±0,3	10,5	2,2	0,3	50	70

\* при частотной отстройке ±20,5 МГц от  $f_0$

На рисунках ниже изображены:  
 – рисунок 10 (а, б): зависимость реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса пассивной части от частоты в полосе пропускания ПАВ фильтра при суммарной управляющей емкости 36Ф;

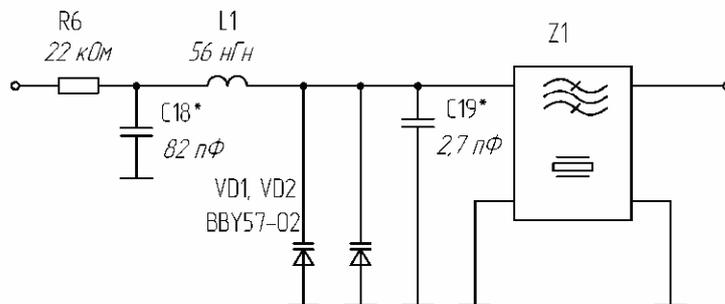


Рисунок 9 – Пассивная часть автогенератора, выполненного по трехточечной схеме

– рисунок 11: зависимость реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса пассивной части от частоты в полосе пропускания ПАВ фильтра при управляющей емкости 6 пФ.

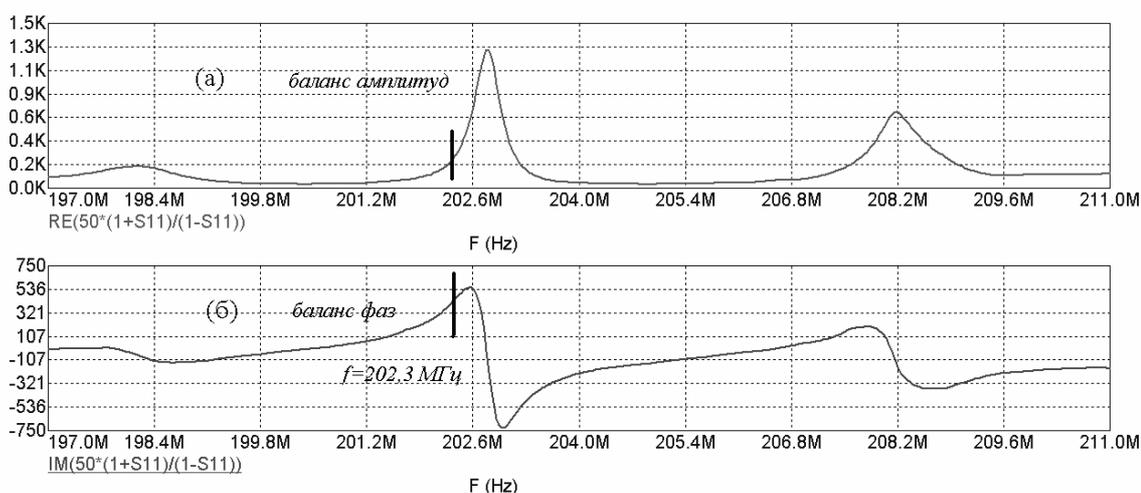


Рисунок 10 – Зависимость реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса пассивной части от частоты в полосе пропускания ПАВ фильтра при управляющей емкости 36Ф

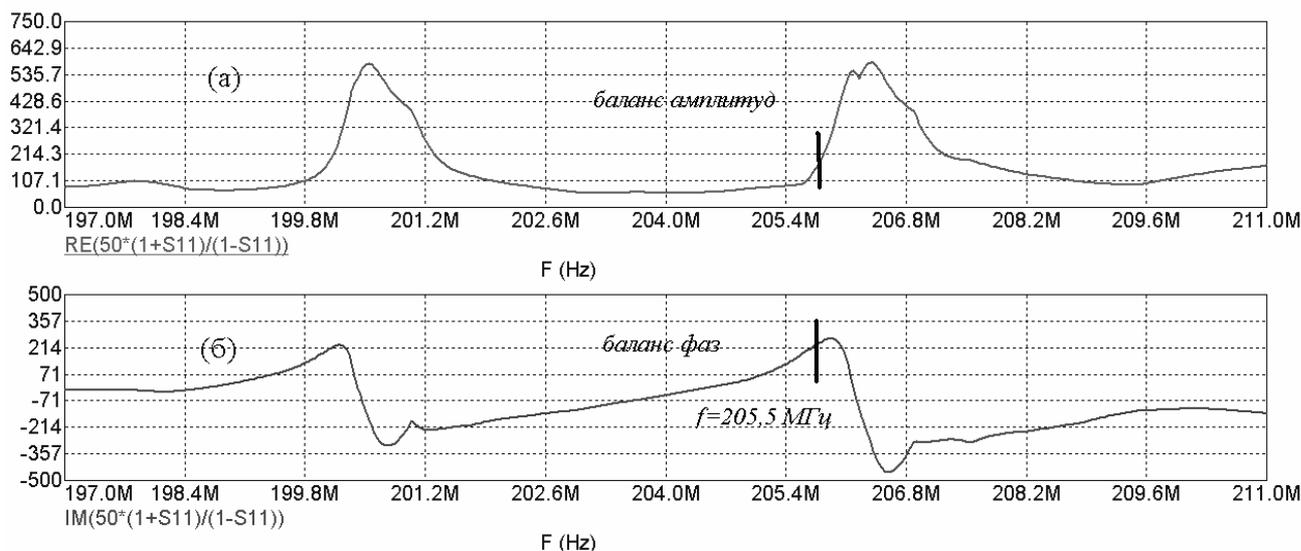


Рисунок 11 – Зависимость реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса пассивной части от частоты в полосе пропускания ПАВ фильтра при управляющей емкости 6 пФ

Из рисунков 10 и 11 видно, что возможная перестройка изменением емкости в П-контуре составляет порядка 3 МГц. При использовании ниобата лития в качестве материала пьезоэлектрика для ПАВ структуры с температурным коэффициентом  $-70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  перестройка 2,5 МГц позволит реализовать температурную компенсацию в интервале не менее 100  $^{\circ}\text{C}$ .

Разработанная модель пассивной части автогенератора на четырехполосном фильтровом ПАВ компоненте с малыми потерями, отличительной особенностью которой является использование одной пары входов четырехполосника для управления комплексным с индуктивным характером импеданса, а другой пары входов - для подключения к схеме автогенератора, позволила подтвердить гипотезу о целесообразности использования ПАВ фильтра с низкими потерями для реализации индуктивной реакции, необходимой для выполнения условия баланса фаз и амплитуд в трехточечной схеме.

Предложенный алгоритм моделирования высокочастотного автогенератора на ПАВ фильтре может быть использован при компьютерном моделировании свойств высокочастотного автогенератора с использованием число-аналитических методов.

**Третья глава** посвящена вопросам повышения температурной стабильности частоты сигнала автогенераторов на ПАВ структуре. В разделе проанализированы конструктивно-технологические, схемотехнические способы и их комбинации для повышения стабильности частоты автогенераторов на ПАВ.

К конструктивно-технологическим способам можно отнести такие направления, как использование биметаллической пластины на обратной стороне пьезоэлектрической подложки (способ основан на изменении расстояния между встречно-штыревыми преобразователями вследствие деформации кристаллической решетки пьезоэлектрической подложки в диапазоне температур), повышения температурной стабильности за счет оптимизации углов среза пластины, использование подложек с тонкими пьезоэлектрическими пленками. В качестве недостатка решения использования пластины и тонких пленок можно выделить потенциально невысокую вибро- и ударостойкость в виду наличия необходимых для конструкции зазоров и стоек при использовании биметаллической пластины и увеличении числа наиболее чувствительных к вибрациям элементов - пьезоэлектриков. Способы повышения стабильности частоты за счет оптимизации углов среза нетехнологичен ввиду повышенных требований к точности изготовления пластин пьезоэлектрика для ПАВ структуры.

Показано, что аналоговые и комбинированные способы синтеза компенсирующей функции (термозависимые изменения реактивных сопротивлений цепей, построенных с использованием конденсаторов и терморезисторов (XR-цепи), подключаемых к частотно-задающему элементу; термозависимые потенциометры (ТЗП) с управляемой ёмкостью на варикапе, включенной последовательно с частотно-задающим элементом; комбинация указанных способов) можно оценить как непригодные для создания генераторов с высокими качественными показателями из-за их низкой точности, нетехнологичности настройки и низкой долговременной стабильности частоты, обусловленной в частности, разбросом параметров элементов (конденсаторов, терморезисторов, транзисторов),

применяемых в аналоговых устройствах температурной компенсации и автогенераторах. Фактически для достижения высокой стабильности частоты для каждого частотно-задающего элемента требуется собственное индивидуально настроенное устройство термокомпенсации. Настройка осуществляется подбором входящих в устройство компенсации элементов или изменением их параметров, например, с помощью лазерной подгонки сопротивлений. Кроме того, при настройке компенсирующего устройства необходимо учитывать нелинейность характеристики управления генератора.

Сделан вывод, что улучшение точности температурной компенсации генераторов с одновременным радикальным повышением технологичности их настройки (а значит и снижения стоимости производства) может быть достигнуто при использовании цифровых способов формирования компенсирующей функции, в частности с использованием микроконтроллеров.

Для реализации цифровой температурной компенсации на микроконтроллере обоснована применимость кусочно-линейной интерполяции для построения синтезатора компенсирующей функции генератора на ПАВ фильтре. Погрешность аппроксимации зависимости частоты от величины управляющего напряжения в диапазоне температур (-55..+55)°С составила не более  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ .

Показано, что для автогенератора, выполненного на ПАВ фильтре с рабочей частотой 200 МГц с линейной ТЧХ ПАВ фильтра с крутизной  $-70 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  при использовании 12-ти битного аналого-цифрового преобразования значения температуры, отклонение частоты  $\sigma f$  составит  $\pm 6 \cdot 10^{-6}$  (рисунок 12).

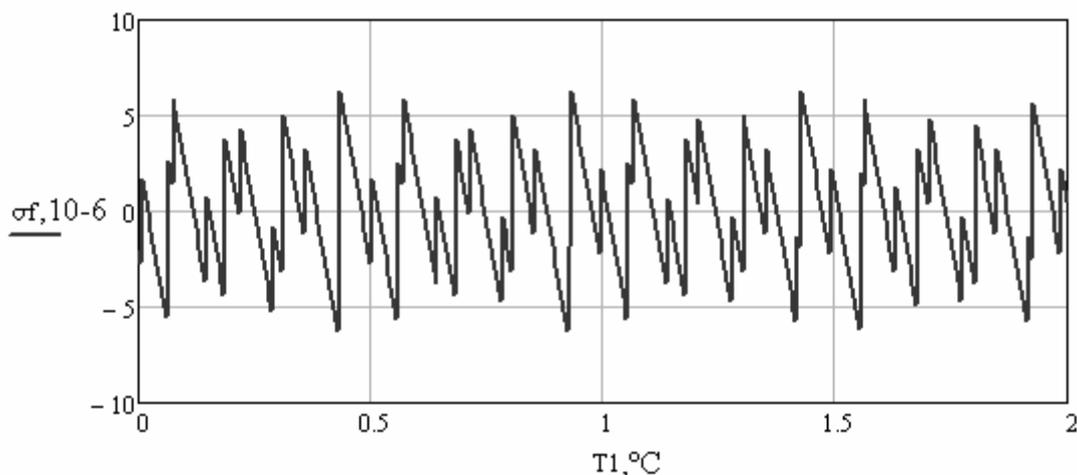


Рисунок 12 – Зависимость отклонения частоты на выходе автогенератора от температуры при идеальной термокомпенсации

В конце раздела сформулированы задачи для исследований: синтезировать компенсирующую функцию на базе микроконтроллера; разработать и практически исследовать макет автогенератора на ПАВ фильтре с цифровой термокомпенсацией; выполнить компьютерное моделирование влияния материала подложки и массогабаритных параметров подложки ПАВ устройства на величину механических напряжений, возникающих при статических ускорениях.

**Четвертая глава** посвящена практической реализации ударостойкого высокочастотного стабильного генератора.

На рисунке 13 показана структурная схема генератора с цифровым термокомпенсирующим устройством.

С целью оптимального использования ресурсов микропроцессора в синтезаторе компенсирующей функции (СКФ) реализован табличный способ аппроксимации температурно-частотной зависимости, когда массив значений кодов ЦАП и АЦП формируется по экспериментальным данным, полученным через температурный интервал  $\Delta T$ , а недостающие значения получают при помощи аппроксимации.

Показано, что оптимальным с точки зрения эффективности-сложность (трудность) реализации способом температурной компенсации является кусочно-линейная аппроксимация со статической обработкой информации. С помощью данного способа реализуется компенсирующая функция вида

$$\bar{U}_y = U_{yj} \times \left( \frac{T_{j+1} - T_{cp}}{T_{j+1} - T_j} \right) + U_{yj+1} \times \left( \frac{T_{cp} - T_j}{T_{j+1} - T_j} \right)$$

где  $U_{yj}$  и  $U_{yj+1}$  – компенсирующее напряжение при температурах  $T_j$  и  $T_{j+1}$ ;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды;  $T_j$  и  $T_{j+1}$  температуры, соответствующие нижней и верхней границе температурного интервала  $\Delta T_{ij}$ .

В разработанном макете использованы ПАВ фильтры производства НПП «Эталон». На основе ПАВ-фильтра с центральной частотой 205 МГц, имеющего линейную фазовую характеристику с фазовым набегом  $\pm 180^\circ$  в полосе пропускания 5 % по уровню -3 дБ на кристалле LiNbO<sub>3</sub> среза YX/49°, была практически разработана схема генератора, основой которой является схема емкостной трехточки с использованием ПАВ-фильтра в качестве индуктивного сопротивления и синтезатор компенсирующей функции (СКФ) на основе микропроцессора C8051F413 -GM для компенсации температурной нестабильности самого генератора. Фотография платы генератора приведена на рисунке 14.

Полученная температурная нестабильность частоты  $\varepsilon$  (рисунок 15) не более  $\pm 35 \cdot 10^{-6}$  в диапазоне (-55...+55) °С при зависимости частоты некомпенсированного ПАВ-генератора более  $72 \cdot 10^{-6}$  на

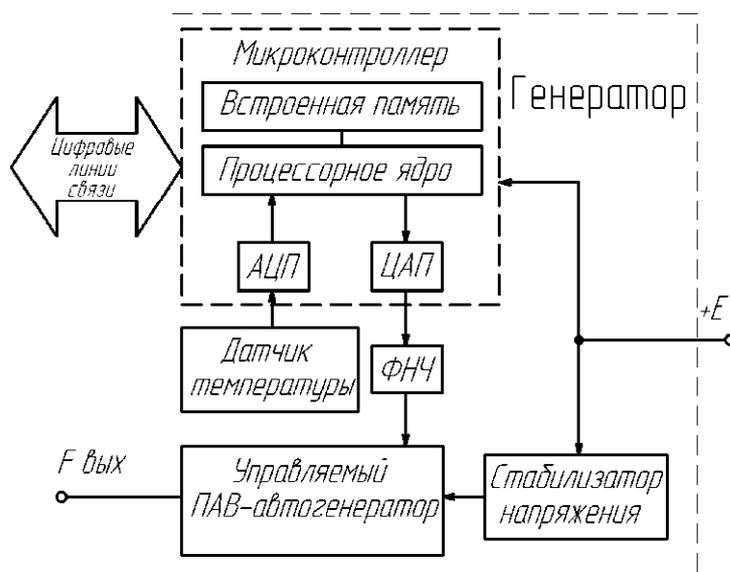


Рисунок 13 – Структурная схема генератора с цифровой температурной компенсацией

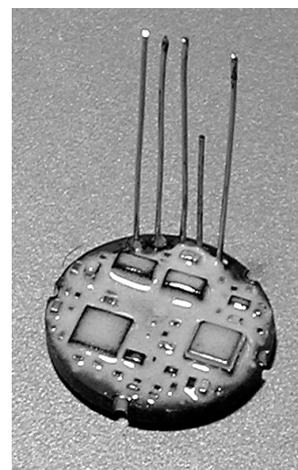


Рисунок 14 – Генератор на ПАВ фильтре

один градус при этом потенциально реализуемая термостабильность в автоматической системе подстройки частоты составила  $\pm 20 \times 10^{-6}$ . Проведённая температурная компенсация увеличила стабильность частоты ПАВ-генератора при изменении температуры более чем в 200 раз.

Выполнен расчет механических напряжений и деформаций в конструкции с ПАВ фильтром с звукопроводом из ниобата лития. Конструкция представляет собой алюминиевый корпус цилиндрической формы, в котором размещен ПАВ фильтр на печатной плате. Расчеты показали, что в диске ПАВ-фильтра (рисунок 16) напряжения концентрируются в нижней части периферийной области, т.е. края фильтра подвергаются максимальной нагрузке. Самое опасное напряжение – это напряжение растяжения. При ускорении 1000 g для данной конструкции оно не превышает 0,5 МПа. При увеличении ускорения все напряжения будут пропорционально возрастать. Если принять предел прочности на разрыв ниобата лития, равным 50 МПа, то максимальная величина ускорения в такой дисковой конструкции составит 100000 g.

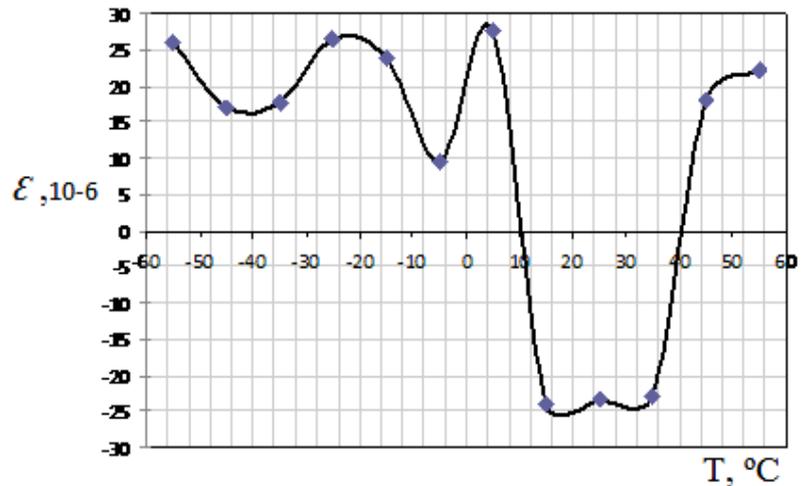


Рисунок 15 – Значение температурной нестабильности 3Г на ПАВ фильтре

SAW horizontal

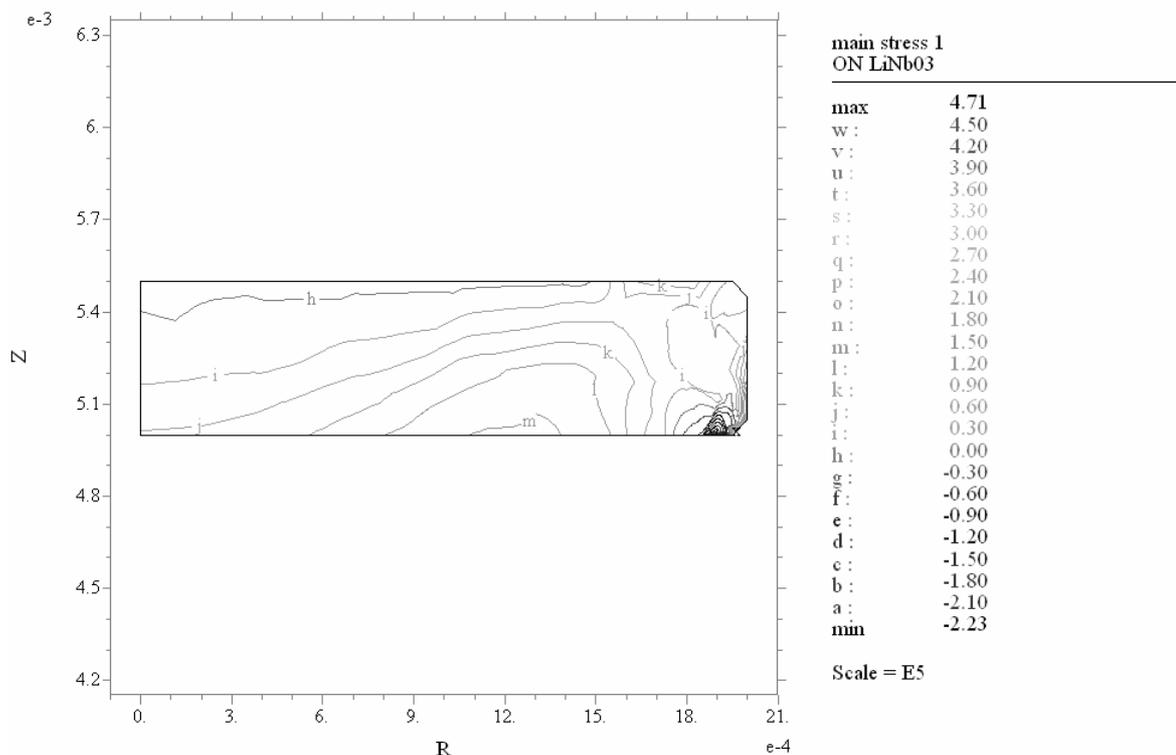


Рисунок 16 – Механические напряжения в звукопроводе ПАВ фильтра из ниобата лития

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ и патентные исследования по способам реализации высокочастотных ударостойких стабильных генераторов с широкой перестройкой по частоте позволили выявить направление проектирования генератора на ПАВ фильтре как оптимальное в силу потенциально высоких электрических и ударопрочных характеристик генератора.

2. Разработанная модель пассивной части автогенератора на четырехполосном фильтровом ПАВ компоненте с малыми потерями, отличительной особенностью которой является использование одной пары входов четырехполосника для управления комплексным с индуктивным характером импеданса, а другой пары входов - для подключения к схеме автогенератора, позволила подтвердить гипотезу о возможности использования ПАВ фильтра с низкими потерями для реализации индуктивной реакции, необходимой для выполнения условия баланса фаз и амплитуд в трехточечной схеме.

3. Показано, что для реализации высокочастотного автогенератора с широкой перестройкой по частоте необходимо использовать материал с высоким коэффициентом электромеханической связи, например, ниобат лития.

4. Создано новое, защищенное патентом схмотехническое решение автогенератора с широкой перестройкой по частоте на ПАВ фильтре.

5. Предложенный способ моделирования частотно-задающей части автогенератора на ПАВ фильтре с использованием волновой матрицы ПАВ фильтра позволил реализовать алгоритм моделирования свойств высокочастотного автогенератора.

6. Выполненный расчет механических напряжений и деформаций, возникающих в звукопроводе из ниобата лития при высоких статических ускорениях, позволил определить места и направления возникновения максимальных растягивающих и сжимающих сил. Показано, что в диске ПАВ-фильтра напряжения концентрируются в нижней части периферийной области, т.е. края фильтра подвергаются максимальной нагрузке. Самое опасное напряжение – это напряжение растяжения.

7. Разработанная система компенсации сдвига частоты автогенератора на ПАВ фильтре из-за изменения внешней температуры позволила повысить температурную стабильность более чем в 200 раз.

8. Разработаны и изготовлены макеты задающего генератора с высокой G-стойкостью на автогенераторе на ПАВ фильтре.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов кандидатской диссертации.*

1. **Ляшук, А.Н.** Исследование генератора на поверхностно-акустических волнах методом двухполосного представления / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов, А.Н. Лепетаев // Омский научный вестник. – 2012. - № 1 (107). – С. 318-323.

2. **Ляшук, А.Н.** Генератор на поверхностных акустических волнах с широкой перестройкой по частоте / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов // Омский научный вестник. – 2011. - № 3 (103). – С. 300-303.

3. Завьялов, С.А. О конструктивных и технологических аспектах создания ударостойких задающих генераторов / С.А. Завьялов, **А.Н. Ляшук**, А.Н. Лепетаев, Г.П. Большагин // Вестник академии военных наук. – Москва, 2010. - № 3 (32). – С. 223-229.

*Патенты.*

4. Пат. 98301 U1 Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/00 (2006.01). Генератор ПАВ [Текст] / Завьялов С.А., **Ляшук А.Н.**; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет. – № 2010114993/09; заявл. 14.04.2010; опубл. 10.10.2010, Бюл. № 28. – 2 с. : ил.

5. Пат. 104798 U1 Российская Федерация, МПК Н 03 В 5/24 (2006.01). Генератор ПАВ [Текст] / Завьялов С. А., **Ляшук А.Н.**, Лепетаев А.Н.; заявитель Омский государственный технический университет; патентообладатели: Омский государственный технический университет и Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт радиоэлектроники и приборостроения» (ООО «НИИРП»). – № 2011100220/09; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 2 с. : ил.

6. Пат. 144346 U1 Российская Федерация, МПК Н 03 В 5/24 (2006.01). Генератор на ПАВ с дискретной температурной компенсацией и коррекцией частоты [Текст] / Хоменко И.В., Завьялов С.А., **Ляшук А.Н.**, Лепетаев А.Н., Косых А. В.; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет. – № 2013157697/08; заявл. 24.14.2013; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. – 2 с. : ил.

*Публикации в других изданиях.*

7. **Ляшук, А.Н.** Генератор на ПАВ фильтре / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов // Наука, образование, бизнес: материалы регион. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов пром. и связи, посвящ. Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2010. – С. 105–109.

8. Завьялов, С.А. Термокомпенсированный генератор на ПАВ / С.А. Завьялов, **А.Н. Ляшук**, А.Н. Лепетаев // Наука, образование, бизнес: материалы регион. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов пром. и связи, посвящ. коллегам в честь 50-летия радиотех. фак. Омского гос. тех. универ. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2011. – С. 150–153.

9. **Lyashuk, A.N.** Surface Acoustic Wave Generator with Digital Temperature Compensation / A.N. Lyashuk, S.A. Zavyalov, A.N. Lepetaev, I.V. Khomenko // XV International Conference for Young Researchers ‘Wave Electronic and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems’ : Preliminary program and Abstracts, Saint-Petersburg, 5-10 September, 2013 – P.12-15.

10. **Ляшук, А.Н.** О выборе фильтра на поверхностных акустических волнах для схемы автогенератора / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов // Наука, образование, бизнес: материалы Всерос. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов пром. и связи, посвящ. 15-летию ИРСИД. – Омск: Изд-во КАН, 2012. – С. 170–174.

11. **Ляшук, А.Н.** Способы повышения температурной стабильности генераторов на ПАВ-структурах / А.Н. Ляшук // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы IV общероссийской научно-технической конференции 10-13 октября 2012 г. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. – С. 242-246.

12. **Ляшук, А.Н.** Высокочастотный автогенератор с термокомпенсацией в широком диапазоне температур / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов, И.В. Хоменко, А.Н. Лепетаев // Динамика систем, механизмов и машин: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.): в 5 кн. – Книга III. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – С. 267-269.

13. **Ляшук, А.Н.** Математический расчет влияния конструктивных особенностей кварцевого резонатора на ударостойкость задающего генератора / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов, А.Н. Лепетаев // Наука, образование, бизнес: материалы Всерос. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов пром. и связи, посвящ. дню Радио. – Омск: Изд-во КАН, 2013. – С. 161–167.

14. **Ляшук, А.Н.** Стабильный генератор на поверхностных акустических волнах / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов, И.В. Хоменко, А.Н. Лепетаев // Сборник докладов II Международной научно-тех. конференции, Омск, 1-4 октября 2013 г. – Радиотехника, электроника и связь, Изд-во «Радиотехника», 2013. – С. 437- 445.

15. **Ляшук, А.Н.** Исследование линейной части автогенератора на ПАВ фильтре путем анализа ее волновой матрицы / А.Н. Ляшук, С.А. Завьялов // Наука, образование, бизнес: материалы Всероссийской научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2014. – С 158-163.

16. **Lyashuk A.N.** SAW filter-based oscillator model / A.N. Lyashuk, S.A. Zavyalov, A.N. Lepetaev // XVII International Conference for Young Reseachers «Wave Electronics and its Applications in the Information and Telecommunication Systems»: Preliminary program and abstracts, Saint-Peterburg, 1-5 June, 2014. – P. 37.