

На правах рукописи



Горевой Андрей Викторович

МАЛОМОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ СВЧ ДЛЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в АО "Научно-производственная фирма "Микран" и ФГБОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР)

**Научный руководитель:** **Задорин Анатолий Семенович**  
доктор физико-математических наук, профессор  
ФГБОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"

**Официальные оппоненты:** **Носков Владислав Яковлевич**  
доктор технических наук, доцент  
ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", г. Екатеринбург

**Скоторенко Илья Вячеславович**  
кандидат технических наук,  
начальник бюро по науке  
ООО "ЛЭМЗ-Т", г. Томск

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский государственный университет", г. Томск

Защита состоится "19" декабря 2017 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.212.268.01 в ТУСУР по адресу:  
г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 230.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУР по адресу:  
г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте  
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/uaaz6nqm>

Автореферат разослан "13" ноября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Современные перестраиваемые источники гармонических сигналов СВЧ с высоким качеством спектра являются сложными системами с высоким энергопотреблением и стоимостью. В ряде измерительных приборов и систем они являются "лидерами" по указанным параметрам. Для функционирования приемных и передающих трактов измерительных приборов, в том числе с непрерывным сканированием по частоте, вполне достаточно мощностей непрерывных СВЧ сигналов единицы-десятки милливольт (то есть маломощных). При этом энергопотребление источника может составлять единицы-десятки ватт, а КПД составлять доли процента. Новые решения в области синтеза частот и генерирования гармонических сигналов СВЧ могут значительно упростить конструкцию многих радиоэлектронных систем или улучшить их технические характеристики или снизить их стоимость, сделать энергоэффективными. Поэтому поиск таких решений является актуальной задачей.

В настоящее время основным способом формирования непрерывных сигналов СВЧ с высокой степенью фазовой стабильности является синтез частоты с помощью петли цифровой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), обеспечивающей минимальное энергопотребление, простоту и удобство использования. Последнее обязано большому распространению специализированных микросхем, включающих практически все элементы петли ФАПЧ: делители частоты опорного сигнала, частотно-фазовый детектор (ЧФД), стабилизируемый генератор, управляемый напряжением (ГУН), схемы управления, контроля и индикации работоспособности системы.

Характерными особенностями цифровой ФАПЧ, ограничивающими ее использование в чистом виде в разработке высококачественных источников СВЧ для измерительной техники, являются:

- 1) шум ЧФД, на 20-30 дБ преобладающий над шумом опорного сигнала в пределах полосы пропускания петли ФАПЧ в области критичных для многих приложений отстроек от несущей 1...1000 кГц;
- 2) наличие сильных помех от работы дробного делителя частоты в обратной связи, призванного обеспечить малый шаг перестройки по частоте, а также помех от биений гармоник опорного сигнала и сигнала ГУН;
- 3) инерционность при перестройке частоты сигнала ГУН из-за наличия фильтрующего низких частот элемента в канале управления частотой ГУН, значительно усиливающаяся при попытках подавления указанных выше помех путем снижения полосы пропускания петли ФАПЧ.

Попытки нивелировать указанные особенности приводят к комбинированному синтезу, зачастую реализующему преобразование частоты в обратной связи ФАПЧ и приводящему к росту энергопотребления и стоимости системы

синтеза частоты в разы. В отношении настольных высококачественных и дорогих приборов такой исход зачастую приемлем в силу отсутствия альтернатив. В случаях относительно недорогих приборов общего применения, а также портативных, это может быть неприемлемым и в результате значительно ограничить уровень их характеристик.

Таким образом, существует потребность в выработке компромиссных решений синтеза частоты, позволяющих при умеренном росте энергопотребления и сложности значительно улучшить электрические параметры выходного сигнала. В условиях миниатюризации радиотехнических систем и устройств это может дать существенный положительный эффект.

### **Цель диссертационной работы**

Развитие техники синтеза частоты в целях улучшения некоторых электрических характеристик синтезаторов, а также снижения их энергопотребления, сложности и стоимости для модернизации или разработки измерительных приборов и систем.

### **Задачи диссертационной работы:**

1. разработка метода синтеза частоты с ФАПЧ, обеспечивающего значительное снижение шага перестройки по частоте при значительном подавлении помех от работы составных частей ФАПЧ и при умеренном росте энергопотребления;
2. модификация метода синтеза частоты с преобразованием частоты обратной связи ФАПЧ с целью снижения паразитных просачиваний дополнительных сигналов на выход системы при сохранении качества спектра фазовых шумов;
3. поиск способов генерирования сигнала гигагерцового диапазона частот с уровнем фазовых шумов ниже, чем у современных высокочастотных опорных кварцевых генераторов, при использовании относительно низкодобротных резонаторов для перспективных разработок сверхмалошумящих синтезаторов частот.
4. разработка линейки генераторов ВЧ и СВЧ на резонаторах различных типов.

### **Методы исследований**

В диссертационной работе приведены результаты теоретического исследования, полученные с использованием методов теории автоматического регулирования, статистической радиотехники, а также приведены результаты натурных испытаний действующих образцов устройств и систем.

### **Научная новизна**

1. Впервые рассмотрено использование делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором в качестве альтернативы микросхеме прямого цифрового синтезатора

частот для формирования сигнала, перестраиваемого по частоте с малым шагом.

2. Впервые предложено использование делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором для формирования сигнала опорной частоты для синтезатора с ФАПЧ, работающего в гигагерцовом диапазоне частот с целью существенного уменьшения шага перестройки по частоте при сохранении качества спектра выходного сигнала.

3. Впервые разработана модель, подтверждающая, что при расчете спектра фазовых шумов выходного сигнала синтезатора частот с ФАПЧ можно ограничиться учетом фазовых шумов частотно-фазового детектора, управляемого генератора и источника сигнала делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором.

4. Впервые предложено и рассмотрено нестандартное решение по формированию опорного сигнала синтезатора частот с ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи путем деления частоты выходного сигнала с целью значительного снижения просачивания на выход системы дополнительного сигнала для преобразования частоты.

5. Впервые разработана модель, подтверждающая, что спектр фазовых шумов выходного сигнала описанной выше системы при больших коэффициентах деления выходной частоты ведет себя аналогично обыкновенной схеме с преобразованием частоты.

### **Практическая значимость**

1. При использовании современных малопотребляющих микросхем ФАПЧ с сигма-дельта модуляторами для формирования сигналов опорной частоты основной петли ФАПЧ можно получить шаг перестройки по частоте не более 1 Гц до частот 20 ГГц при сохранении качества спектра выходного сигнала на уровне, определяемом основной ФАПЧ.

2. Использование описанного подхода позволяет строить малопотребляющие сверхширокополосные синтезаторы частот и измерительные генераторы сигналов на их основе до 20 ГГц.

3. С помощью АПЧ с дискриминатором на дисковом керамическом резонаторе можно построить малощумящий источник гигагерцового диапазона частот с качеством спектра не хуже кварцевого генератора, умноженного по частоте, для использования в перспективных конструкциях синтезаторов частот и РЛС.

4. Практические рекомендации и предложения диссертационной работы, а также пять патентов автора на изобретение, полезную модель и на промышленный образец фактически используются при разработках малощумящих автосинтезаторов и синтезаторов частот АО "НПФ "Микран".

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается корректностью применения математического аппарата при получении аналитических выражений, а также натурными испытаниями, результаты которых согласуются с ре-

зультатами, полученными по аналитическим выражениям и экспериментальными исследованиями, проведенными другими авторами.

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

1. С использованием относительно низкодобротных керамических дисковых резонаторов можно построить опорный генератор СВЧ 4 ГГц с качеством спектра не хуже кварцевого термостатированного кварцевого генератора, умноженного по частоте до 4 ГГц;
2. Использование преобразования частоты дробного делителя частоты с сигма-дельта модуляцией вверх с помощью умноженного по частоте опорного кварцевого генератора для формирования опорного сигнала ФАПЧ позволяет получить герцовую перестройку частоты до 20 ГГц, существенно экономить в энергопотреблении по сравнению с применением прямого цифрового синтезатора и сохранить уровень фазовых шумов выходного сигнала, обеспечиваемый микросхемой выходной ФАПЧ на отстройках выше 1 кГц;
3. В схемах синтезаторов частот с преобразованием частоты в обратной связи ФАПЧ использование выходного сигнала для формирования опорного путем деления его частоты может обеспечить уровень фазовых шумов минус 125 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 7 ГГц.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на "24, 25, 26 международных Крымских конференциях СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", "11, 12 международных научно-практических конференциях "Электронные средства и системы управления", Всероссийских научно-технических конференциях студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР 2006, 2008, 2012-2017";

Действующие образцы устройств демонстрировались на выставках РадЭл 2013-2016 Санкт-Петербург, U-NOVUS 2014 Томск, Productronica 2015 Munich, European Microwave Week 2016 London.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 36 работ, из них:

- монография "Управляемые генераторы СВЧ";
- 3 статьи в научных журналах (Доклады ТУСУР, Труды НИИР), включенных в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК;
- 3 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus.
- 1 статья в зарубежном журнале, индексируемом в Scopus,
- 1 патент на изобретение, 3 патента на полезную модель, 1 патент на промышленный образец,
- 3 статьи в нерцензируемых отраслевых журналах,
- 20 докладов в сборниках конференций.

### **Личный вклад автора**

Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Разработка математических моделей, описывающих спектры фазовых шумов и соотношения частот в синтезаторах, выполнена лично автором. Разработка архитектуры синтезаторов частот, проведение экспериментов выполнены автором лично.

Моделирование микрополоскового устройства возбуждения бегущей волны в дисковом резонаторе с модами "шепчущей галереи" и эксперименты с ним выполнены совместно с А.А. Лукиной.

Разработка модели, описывающей спектр фазовых шумов в малошумящем генераторе со стабилизирующим керамическим резонатором, выполнена на основе результатов, полученных Д.П. Царапкиным, Н. Штином в рамках работ с дисковыми резонаторами, возбуждаемыми модами с большим азимутальным и низкими радиальным и аксиальным индексами (модами "шепчущей галереи"). Эксперименты с генератором выполнены автором лично.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения, списка литературы из 124 наименований, 3 приложений и содержит 97 страниц основного текста, 58 рисунков, 1 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость и приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору основных методов синтеза, архитектур синтезаторов частот, автогенераторов ВЧ и СВЧ, типов и некоторых свойств резонаторов. Описаны основные достоинства и недостатки методов синтеза частоты. Описана эволюция самого массового на сегодняшний день метода синтеза частоты с петлей ФАПЧ от аналоговой до цифровой с дробным делителем частоты с сигма-дельта модуляцией в обратной связи.

Рассмотрены основные пути улучшения электрических характеристик синтезаторов частот (качества спектра выходного сигнала, параметров перестройки частоты) с выходом на идею комбинированного синтеза.

Обозначен современный уровень источников ВЧ и СВЧ на примере изделий некоторых производителей.

Во **второй главе** выведены основные соотношения, позволяющие рассчитать соотношения частот в синтезаторах с ФАПЧ, в том числе с применением делителя частоты с сигма-дельта модуляцией для формирования опорного

сигнала, нестандартным способом формирования опорного сигнала в синтезаторе с ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи.

Выведены соотношения для передаточных характеристик указанных выше систем, позволяющие рассчитать спектральные характеристики фазовых шумов выходного сигнала.

Адаптирована математическая модель АПЧ со стабилизирующим резонатором для расчета спектральных характеристик фазовых шумов стабилизированного генератора.

Показано, что применение специальной схемотехники типа комбинированной стабилизации сигнала или АПЧ со стабилизирующим высокодобротным резонатором (см. рисунок 1) является эффективным способом снижения фазовых шумов генераторов на десятки децибел.

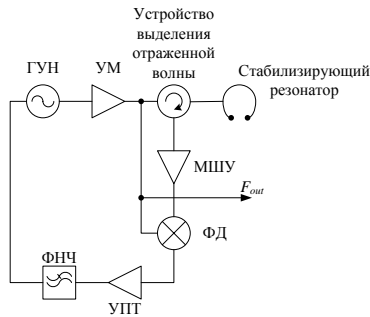


Рисунок 1 – Схема генератора, стабилизированного внешним резонатором через АПЧ

В пределах полосы пропускания петли АПЧ и при бесконечно малом коэффициенте отражения от резонатора спектр фазовых шумов выходного сигнала системы рассчитывается по формуле (1):

$$S_{\varphi}(f) = \frac{\alpha \cdot F \cdot k \cdot T}{2 \cdot P_{in}} \left( \frac{F_0}{f \cdot Q_0} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь мощности при выделении отраженной от резонатора волны;

$F_0$  – резонансная частота;

$F$  – коэффициент шума МШУ;

$Q_0$  – собственная добротность резонатора;

$T$  – абсолютная температура;

$k$  – постоянная Больцмана;

$P_{in}$  – мощность сигнала на входе АПЧ.

Рассмотрен случай, когда в дискриминаторе использован диэлектрический резонатор на частоту около 4 ГГц с собственной добротностью около 8 тысяч. Отраженная волна выделяется квадратурным делителем мощности с суммар-



ными потерями 8 дБ и приходит на МШУс коэффициентом шума около 2 дБ, а мощность входного сигнала 0,5 Вт. На рисунке 2 показаны расчетные характеристики спектра фазовых шумов выходного сигнала в разных режимах работы и в сравнении с одним из представителей кварцевых генераторов.

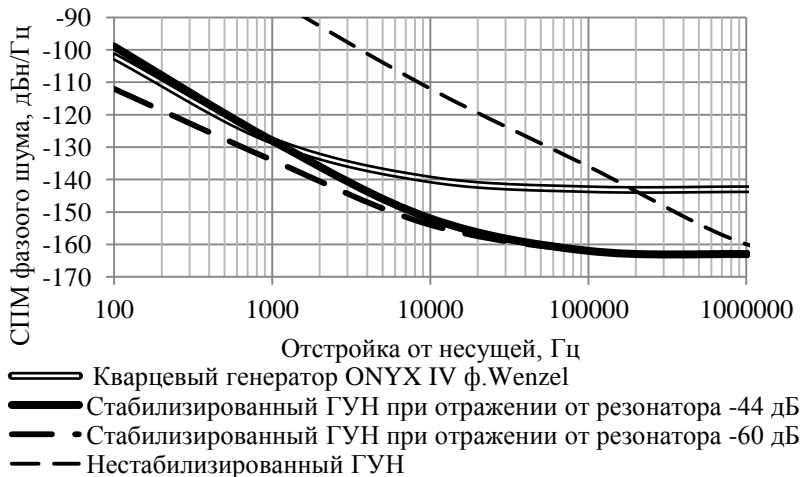


Рисунок 2 – Расчетные спектры фазовых шумов

Полученные данные можно рассматривать в качестве основы в перспективных разработках синтезаторов частот в качестве источника опорного сигнала.

Была предложена оригинальная схема построения синтезатора с ФАПЧ, позволяющая исключить применение затратного прямого цифрового синтезатора в качестве формирователя опорного сигнала (см. рис. 3).

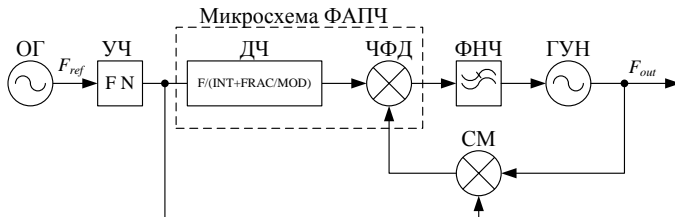


Рисунок 3 – Способ получения малого шага перестройки по частоте

Установлено, что шаг перестройки частоты ГУН определяется шагом перестройки частоты на выходе ДЧ с высокой точностью равным:

$$\delta F \approx \frac{F_{in}}{MOD \cdot INT^2}, \quad (2)$$

где  $F_{in}$  – частота на входе делителя частоты с сигма-дельта модулятором;  
 $INT$  – целая часть коэффициента деления частоты в обратной связи;



связи петли ФАПЧ с источником дополнительного сигнала. Для этого предлагается деление частоты выходного сигнала ФАПЧ и подача его на опорный вход, как показано на рисунке 5.

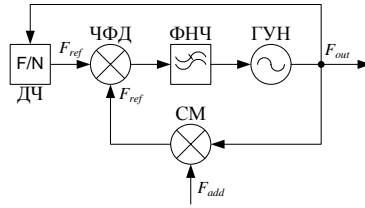


Рисунок 5 – Схема синтезатора частот с делением частоты ГУН для формирования опорного сигнала

Установлено, что выходная частота системы определяется по формуле (3):

$$F_{out} = F_{add} \cdot \frac{N}{N \pm 1}, \quad (3)$$

где  $F_{add}$  – частота дополнительного сигнала;  
 $N$  – коэффициент деления частоты дополнительного сигнала.

Выведено выражение для коэффициента передачи разомкнутой петли ФАПЧ (4):

$$K_{loop}(f) = \frac{K_{\varphi}}{2\pi j f} \cdot K_v \cdot K_{lf}(f) \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right), \quad (4)$$

где  $K_{\varphi}$  – крутизна дискриминационной характеристики ЧФД;  
 $K_v$  – крутизна регулировочной характеристики стабилизируемого генератора;  
 $K_{lf}(f)$  – комплексный коэффициент передачи фильтра сигнала ЧФД, имеющий пропорционально-интегрирующий вид.

При отсутствии деления частоты ( $N=1$ ) (4) обнуляется, что возможно физически при отсутствии преобразования частоты – ЧФД сравнивает фазу сигнала ГУН с самой собой и, естественно, имеет нулевой выход.

При делении частоты пополам, в (4) появляется множитель характерный случаю деления частоты на два в обратной связи типовой ФАПЧ.

При коэффициентах деления  $N$  много больше единицы, что на практике легко выполнимо, (4) стремится к выражению для уже известного преобразования частоты в обратной связи.

Показано, что решение делить выходную частоту дает системное преимущество в виде минимальной связи между системой формирования дополнительного и выходного сигналов – исключительно через смеситель. В канале промежуточной частоты смесителя устанавливаются ФНЧ, существенно подавляющие относительно высокочастотные входные сигналы смесителя. Тогда

ослабление просачивания дополнительного сигнала на выход системы легко выполняется развязывающими усилителями и аттенюаторами в канале сигнала ГУН.

К тому же, дополнительный сигнал может иметь обогащенный гармониками спектр, а система будет выполнять функцию фильтра гармоник с регулируемым смещением частоты.

В **третьей главе** приводятся и обсуждаются результаты реализации и испытаний устройств, построенных с использованием описанных выше идей.

Описаны образцы двух генераторов 4 ГГц, построенных на керамических коаксиальных резонаторах и стабилизированных дисковыми керамическими резонаторами через систему АПЧ. На рисунке 6 приведены фото и схема генератора.

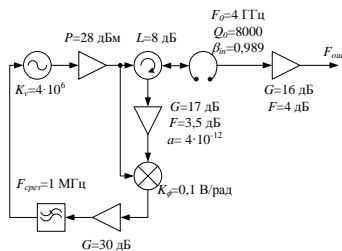
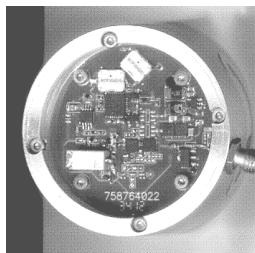


Рисунок 6 – Фото и схема стабилизированного генератора

На рисунке 7 приведены спектры фазовых шумов: расчетный, измеренный и, для сравнения, двух генераторов на сапфировом резонаторе с модами "шепчущей галереи" и на дисковом диэлектрическом резонаторе. Как видно из рисунка 7, результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетами. По своим характеристикам генератор превосходит один из лучших в своем классе образцов – генератор на дисковом керамическом резонаторе, но уступает генератору на резонаторе с модами шепчущей галереи, имеющему добротность на порядок больше.

Приведены результаты экспериментов с синтезатором частот, построенным по схеме показанной на рисунке 4 с использованием малопотребляющей микросхемы ФАПЧ ADF4159 ф. Analog Devices. На рисунке 8 показаны спектры фазовых шумов синтезатора опорной частоты, построенного по схеме приведенной на рисунке 3. Там же для сравнения приведена кривая уровня СПМ фазовых шумов ФАПЧ в типовом включении. Видно, что описанное решение позволяет значительно снизить уровень фазовых шумов.

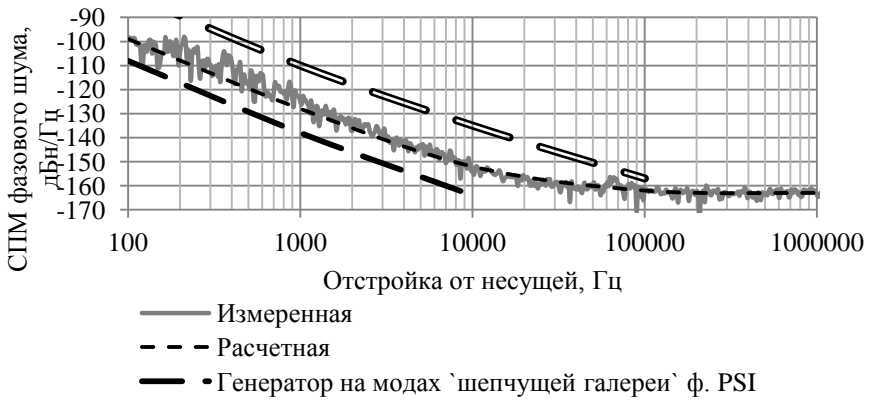


Рисунок 7 – Спектры фазовых шумов

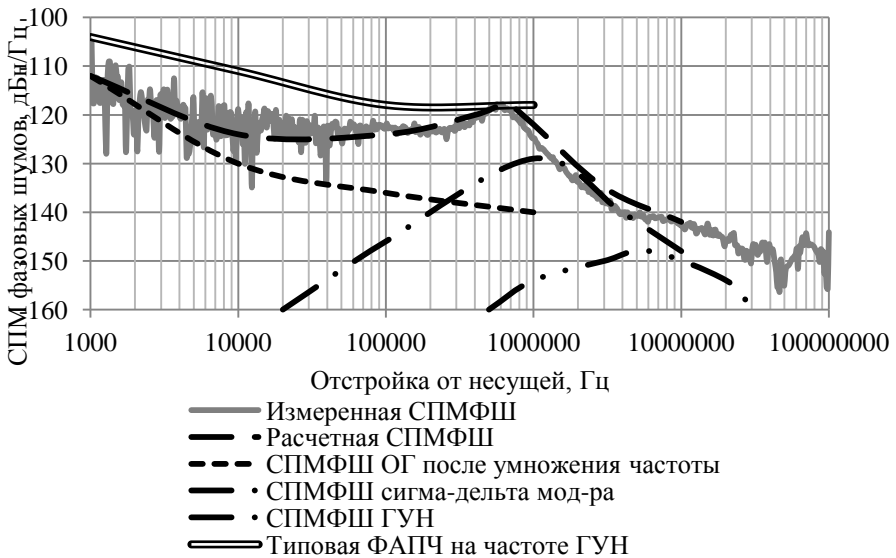


Рисунок 8 – Спектры фазовых шумов синтезатора опорной частоты

Следующим шагом стало построение сверхширокополосного синтезатора от 25 МГц до 20 ГГц с применением структуры, показанной на рисунке 4. В системе использован октавный ГУН диапазона 10-20 ГГц с последующим делением частоты с коэффициентами от 1 до 512. Измерены спектры фазовых шумов на различных частотах (см. рисунок 9). Отмечается, что характеристика спектра фазовых шумов на частоте 1 ГГц, точно совпадает в диапазоне отстроек от 1 до 10 кГц с расчетным уровнем по описанию примененной микросхемы ФАПЧ MAX2880 ф. Maxim Integrated. На отстройках выше 10 кГц сказывается влияние петли ФАПЧ и фазовых шумов ГУН, ниже – опорного генератора системы. Таким образом, элементы опорного синтезатора можно не учитывать

при расчете итогового спектра фазовых шумов системы, о чем косвенно свидетельствует рисунок 8. Измеренный уровень помех был ниже минус 60 дБн с их преимущественным положением далеко за пределами полосы пропускания петли ФАПЧ. На рисунке 10 показана осциллограмма биений между двумя сигналами синтезаторов, отстоящими друг от друга на величину минимального шага. Из рисунка 10 видно, что величина шага перестройки по частоте немного меньше 1 Гц.

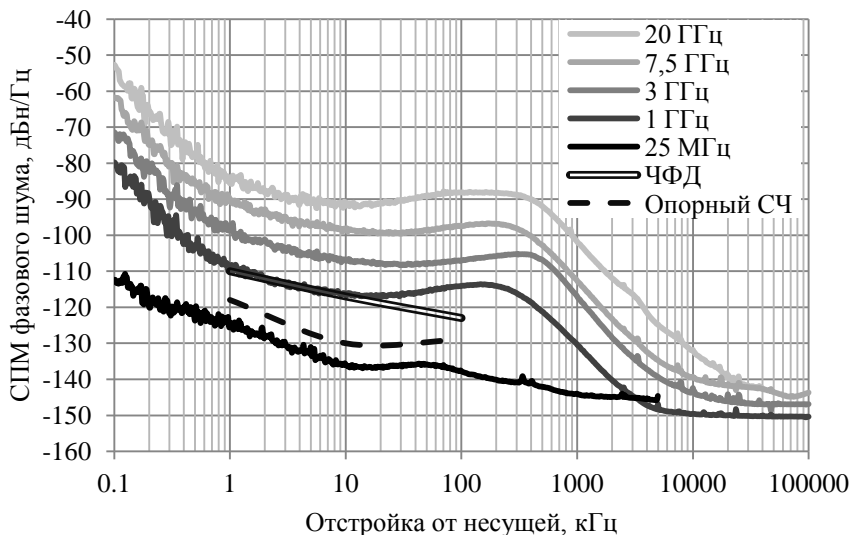


Рисунок 9 – Спектры фазовых шумов синтезатора опорной частоты

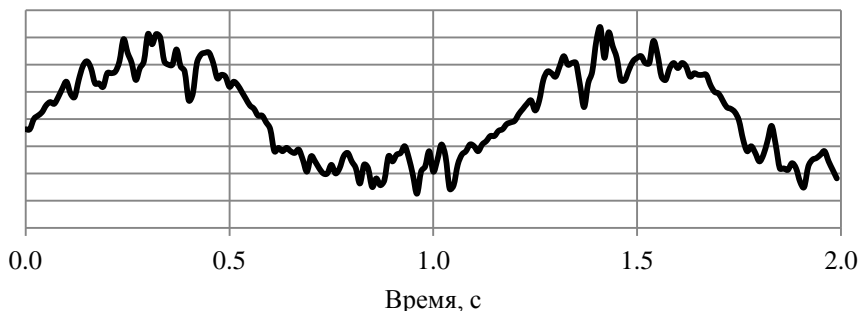


Рисунок 10 – Биения двух сигналов с разницей частот в минимальный шаг

Дано описание октавного синтезатора частот 5-10 ГГц с малыми фазовыми шумами и шагом перестройки порядка микрогерц с использованием структуры, показанной на рисунке 5. На рисунке 11 приведены схема и фото системы.

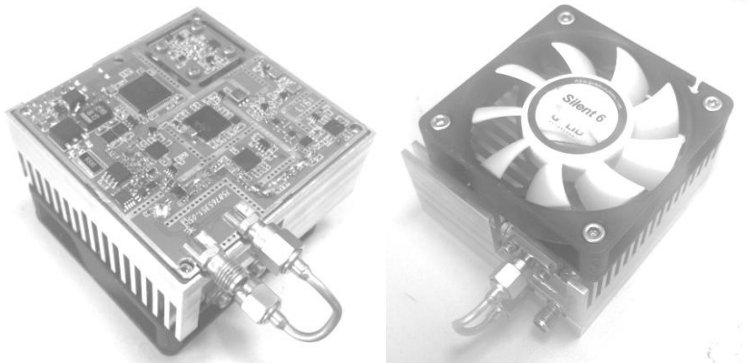
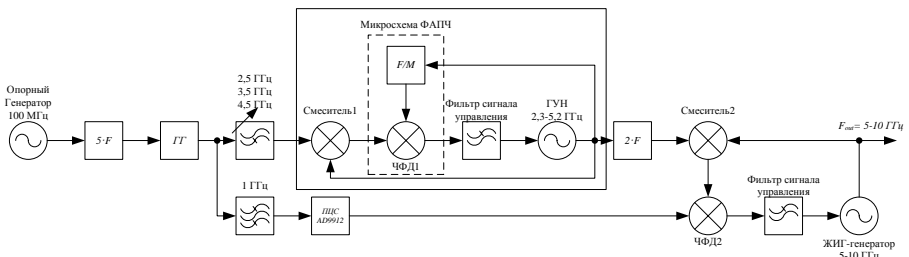


Рисунок 11 – Схема и фото октавного синтезатора частот

Как видно из рисунка, описанное ранее решение использовано для формирования дополнительного сигнала для преобразования частоты октавного генератора на ЖИГ-резонаторе 5-10 ГГц в обратной связи ФАПЧ. Опорный сигнал для нее формируется микросхемой прямого цифрового синтезатора. Таким образом, в системе присутствуют две петли ФАПЧ, одна из которых вложена в другую. Опорный высокочастотный кварцевый генератор интегрирован в конструкцию печатной платы (в верхнем углу). Синтезатор частоты дополнительного сигнала с генератором гармоник опорного сигнала размещен в правом углу. Опорный прямой цифровой синтезатор – в середине, а в левом углу – драйвер генератора с ЧФД основной петли и управляющий микроконтроллер. ЖИГ-генератор расположен на обратной стороне корпуса под вентилятором. Размеры всего устройства не превосходят 70 мм. Спектр фазовых шумов выходного сигнала на частоте 7 ГГц приведен на рисунке 12. Измеренный уровень помех не превосходит минус 70 дБн.

Отмечается, что в процессе выполнения работы также были построены генераторы на резонаторах различных типов: термостатированные кварцевые, октавные на колебательных контурах, на ПАВ-резонаторах, коаксиальных керамических резонаторах (КР), на ЖИГ-резонаторах и дисковых керамических (ДР) и резонаторах с модами "шепчущей галереи"(см. рисунок 13).

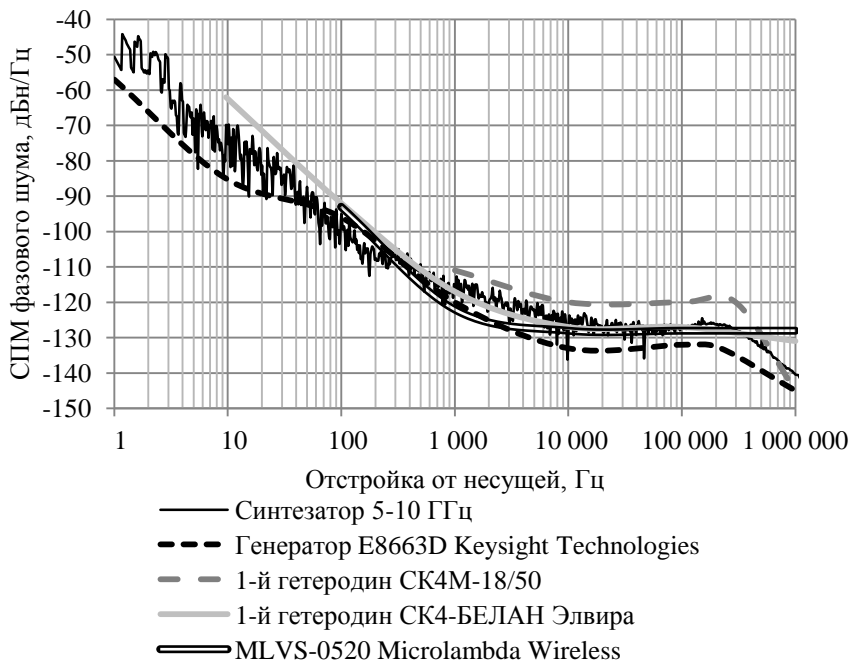


Рисунок 12 – Спектр фазовых шумов синтезатора частот на частоте 7 ГГц

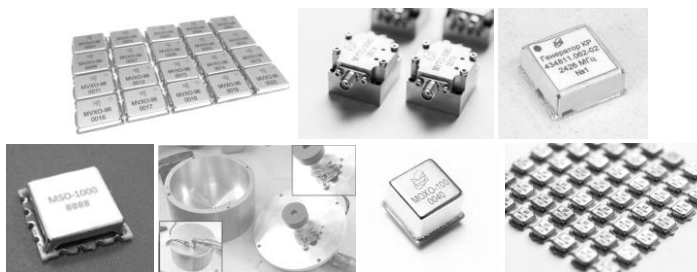


Рисунок 13 – Генераторы построенные в процессе выполнения работы (слева-направо, сверху-вниз): высокочастотные кварцевые ГУН, ЖИГ-генераторы, генератор на КР, на ПАВ-резонаторе, ДР, термостатированный кварцевый, октавные ГУН 2-4 ГГц

Отмечается, что достигнутый успех по разработке и исследованию малошумящего генератора, стабилизированного АПЧ, открывает перспективу создания малошумящих синтезаторов частот нового поколения с относительно небольшой стоимостью и энергопотреблением. Единственной альтернативой данным генераторам являются генераторы на модах "шепчущей галереи", способные обеспечить на порядки меньший фазовый шум, но использующие в своем составе монокристаллические резонаторы. Эти резонаторы очень трудно обрабатывать для подгонки частоты, они относительно крупногабаритные.



Керамические резонаторы в этом смысле более удобны, так как легко обрабатываются и гораздо меньше по размерам.

Подчеркивается, что существенное снижение шага перестройки частоты синтезатора с ФАПЧ, полученное путем использования дробного делителя частоты с преобразованием его выходного сигнала вверх имеет интересную перспективу построения портативных лабораторных генераторов сигналов СВЧ с питанием и управлением по очень распространенной шине USB. Благодаря умеренному росту энергопотребления синтезатора частот с типовой ФАПЧ, оцениваемому на уровне двух-трех раз, оказывается возможным реализовать в устройстве дополнительные функции регулировки мощности выходного сигнала, модуляции и пр., характерные для настольных измерительных генераторов. Даже беглый анализ рынка доступных приборов показывает почти полное отсутствие таковых – с совокупностью функциональных возможностей настольных генераторов и питанием от шины с крайне ограниченным энергоресурсом. Свое воплощение данная идея получила в генераторах сигналов линейки Portable Lab Devices от 25 МГц до 6/12/20ГГц PLG06/12/20, производимых в АО "НПФ "Микран" (см. рисунок 14).



Рисунок 14 – Внешний вид генератора сигналов PLG12

Построение такого компактного октавного синтезатора частот с улучшенным качеством спектра выходного сигнала позволяет существенно модернизировать анализаторы спектра СК4М и генераторы сигналов Г7М производства АО "НПФ "Микран" и вывести их по качеству спектра выходного сигнала на мировой уровень, прочно удерживаемый такими известными производителями, как Keysight Technologies (США) и Rohde&Schwarz (Германия). По качеству спектра выходного сигнала описанный синтезатор практически не уступает зарубежным приборам, использующим аналогичные решения, но намного превосходит серийные изделия Микран, одно из которых (первый гетеродин анализатора спектра) было описано в [1].

В работе констатируется острый дефицит на отечественном рынке доступных генераторов российского производства, являющихся неотъемлемой частью любого синтезатора частот. В некоторой степени эта ниша заполняется лишь кварцевыми генераторами известной фирмы Морион, Санкт-Петербург.

В остальном, на рынке представлены исключительно импортные изделия, которые в условиях последнего времени получают все растущие ограничения при поставках в страну. Зафиксирован устойчивый рост обращений в АО "НПФ "Микран" по поводу заказа генераторов, разработанных автором и серийно производимых "НПФ "Микран". Практически все генераторы, показанные на рисунке 13, внедрены в серийное производство и счет произведенных изделий идет на сотни-тысячи. По своим параметрам некоторые генераторы превосходят зарубежные аналоги. Таким образом, данной работой решается задача поддержки производства высококачественных радиоэлектронных узлов на территории РФ.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Обоснована возможность построения малошумящих генераторов СВЧ с качеством спектра, превосходящим умноженные по частоте традиционные кварцевые генераторы, с использованием относительно низкодобротных и простых в использовании резонаторов. Приведены необходимые выражения для расчета спектра фазовых шумов.
2. Обоснована возможность существенного улучшения параметров перестройки частоты синтезаторов с ФАПЧ при сохранении качества спектра выходного сигнала на исходном уровне и умеренном росте энергопотребления. Приведены выражения, подтверждающие достижимость малого шага перестройки без ухудшения спектра фазовых шумов выходного сигнала.
3. Обоснована допустимость использования деления частоты выходного сигнала для формирования опорного в синтезаторе с ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи. Приведены выражения для соотношений частоты и передаточных характеристик системы.
4. Приведены практические результаты испытаний реальных устройств, подтверждающие математические модели.
5. Приведены описания устройств, построенных на основе авторских подходов, рассматриваемых в данной работе, разработанных в процессе ее выполнения и внедренных в серийное производство.

В **приложении** приведены копии актов внедрения результатов работы, копии дипломов конференций, свидетельств выставок, почетных грамот, сертификатов именных стипендий.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Монографии:*

1. Глазов, Г.Н. Управляемые генераторы СВЧ / Г.Н. Глазов, **А.В. Горевой**. – Томск.: Изд-во "Красное знамя", 2015. 1014 с.

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук:*

2. Андронов, Е.В. Угловая модуляция в синтезаторах СВЧ с ФАПЧ / Е.В. Андронов, **А.В. Горевой** // Доклады ТУСУР. 2009. Ч.1 С. 30-35.
3. **Горевой, А.В.** Генератор диапазона 1-2 ГГц с повышенной крутизной регулировочной характеристики. / А.В. Горевой // Доклады ТУСУР. 2011. Ч.1 С. 44-49.
4. **Горевой, А.В.** Режим резонанса бегущей волны в диэлектрическом дисковом резонаторе автогенератора сантиметрового диапазона. / А.В. Горевой, А.С. Задорин, А.А. Лукина // Труды НИИР. 2017 №2 С. 29-32.

*Патенты Российской Федерации:*

5. Патент на полезную модель №170771. Российская федерация, МПК H01P 1/20 Направленный фильтр СВЧ / **А.В. Горевой**, А.А. Лукина; заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2016145709. Заявл. 22.11.2016, опублик. 05.05.17 Бюл. №13.
6. Патент на промышленный образец №94988. Российская федерация, МКПО 10-05;14-02 Синтезатор частот / **А.В. Горевой**; заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2014502186. Заявл. 03.06.2014, опублик. 16.08.15.
7. Патент на полезную модель №132933. Российская федерация, МПК H03B 5/32 Термостатированный кварцевый генератор / **А.В. Горевой**; заявитель и патентообладатель АО "НПФ Микран" (RU) – заявка №2013113825/08. Заявл. 27.03.2013, опублик. 27.09.2013. Бюл. №27.
8. Патент на изобретение №2523188. Российская федерация, МПК H03L 7/16. Синтезатор частот / **А.В. Горевой**; Заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2013115792/08. Заявл. 09.04.2013, опублик. 20.07.2014. Бюл. №20.
9. Патент на полезную модель №124092. Российская федерация, МПК H03B 5/24. Генератор, управляемый напряжением / **А.В. Горевой**; Заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2012139599/08. Заявл. 03.09.2012, опублик. 10.01.2013. Бюл. №1.

*Публикации в зарубежном журнале, индексируемом в Scopus:*

10. **Gorevoy A.V.** A low noise oscillator based on a conventional dielectric resonator // Microwave Journal. 2013. Vol. 56. Issue 11. pp. 84-94.

*Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:*

11. **Gorevoy A.V.** Frequency Modulation in Microwave Phase Lock Loop Synthesizers // Siberian Conference on Control and Communications SIBCON–2009. Tomsk. 2009. pp. 280-284. DOI: 10.1109/SIBCON.2009.5044871

12. **Gorevoy A.V.** Achieving sub-Hz frequency resolution in high spectral purity and low power frequency synthesizers // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014. pp. 97-98 DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959306
13. **Gorevoy A.V.** On the application of method increasing frequency resolution in a portable wideband microwave generator // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014. pp. 916-917 DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959692
- Публикации в других научных изданиях:*
14. **Горевой А.В.**, Лукина А.А., Пилин Н.В., Аманбаев Н. Возбуждение дискового диэлектрического резонатора бегущей волной // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2017". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2017. В восьми частях. Ч. 1. С. 125-128
15. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Реализация четырехпортового направленного фильтра с бегущей волной типа "шепчущей галереи" // Материалы XII международной научно-практической конференции "Электронные средства и системы управления". Томск.: В-Спектр, 2016. В двух частях. Ч. 1. С. 182-184.
16. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Возбуждение резонатора бегущей волны моды "шепчущей галереи" с линией передачи с распределенной связью // 26-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2016. В двух частях. Ч. 1. С. 1311-1314.
17. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Исследование направленного фильтра на СВЧ-резонаторе с эффектом волн "шепчущей галереи" // Материалы XI международной научно-практической конференции "Электронные средства и системы управления". Томск.: В-Спектр, 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 262-265.
18. **Горевой А.В.**, Конкин Д.А., Лукина А.А., Толендиев Г.К. Оптоэлектронный генератор с волоконно-оптической линией задержки: численное моделирование и экспериментальное исследование // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2015". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2015. В пяти частях. Ч. 2. С. 26-29.
19. **Горевой А.В.** [и др.] Макет оптоэлектронного генератора с волоконно-оптической линией задержки // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2015". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2015. В пяти частях. Ч. 2. С. 70-72.
20. Лукина А.А., Толендиев Г.К., **Горевой А.В.** Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 1035-1036.

21. **Горевой А.В.**, Лирник А.В. Измерение шумовых параметров резонатора на квази-ПАВ // 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 900-901.
22. **Горевой А.В.** Современные возможности создания портативных измерительных генераторов СВЧ с высокими метрологическими характеристиками // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2014". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2014. В пяти частях. Ч. 1. С. 152-155.
23. **Горевой А.В.**, Лирник А.В. Модернизация генератора с ЖИГ-резонатором // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2013". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2013. В пяти частях. Ч. 1. С. 304-306.
24. **Горевой А.В.** Генератор 4 ГГц на дисковом керамическом резонаторе с эквивалентной добротностью 50 тысяч // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2012". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2012. В пяти частях. Ч. 1. С. 173-176.
25. **Горевой А.В.** Малозумящий термостатированный кварцевый генератор // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2012". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2012. В пяти частях. Ч. 1. С. 170-173.
26. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** Генератор диапазона 1-2 ГГц с резонатором на сосредоточенных элементах для октавных синтезаторов частот // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 24-29.
27. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** О возможности снижения фазового шума генератора СВЧ с помощью петли ФАПЧ на стробируемом фазовом детекторе // Обмен опытом в области создания радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 20-24.
28. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** Генератор 2,2 ГГц с ультранизким фазовым шумом на керамическом коаксиальном резонаторе // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г.. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 15-19.
29. **Горевой А.В.** Способ улучшения скоростных характеристик синтезатора частот // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2008". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2008. В пяти частях. Ч. 2. С. 233-236.

30. **Горевой А.В.** Воздействие вибрации на СВЧ-генераторы // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2008". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2008. В пяти частях. Ч. 2. С. 230-233.
31. **Горевой А.В.** G-чувствительность к вибрации СВЧ-генераторов различных типов // Электронные и электромеханические системы и устройства. XVI научно-практическая конференция 10-11 апреля 2008 г. Томск: НПЦ Полкус, 2008. С. 65-66.
32. **Горевой А.В.** Чувствительность СВЧ-генераторов к вибрации // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Современная техника и технологии. Материалы конференции. Томск.: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. С. 230-231.
33. **Горевой А.В.,** Тунгусов А.А. Синтезатор частот диапазона 910-940 МГц // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2006". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2006. В пяти частях. Ч. 1. С. 20-22.

*Публикации в нерецензируемых отраслевых журналах:*

34. **Горевой А.В.** Универсальные СВЧ USB-генераторы как замена настольным гигантам // Современная электроника. – М.: 2015. №8. С.54-60.
35. **Горевой А.В.** Архитектура широкополосных синтезаторов частот для панорамных сканирующих приборов СВЧ // Вестник метролога. – М.: 2013. №3. С. 23-27.
36. **Горевой А.В.** Выбор генераторов для построения малошумящих синтезаторов частот // Компоненты и технологии. – М.: 2012. №6. С. 87-92.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Chenakin A. From a Russian source: Oscillator and synthesizer developments in Russia // Microwave Journal. 2013. Vol. 50. Issue 5.