

На правах рукописи



МУРАСОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЭМС
РЕЗОНАТОРОВ**

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: Косых Анатолий Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Шакин Олег Васильевич,
д.т.н., Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
г. Санкт Петербург

Доберштейн Сергей Александрович,
к.т.н., ОАО «Омский научно-исследовательский
институт приборостроения», г. Омск

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 15.00 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 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. Источник опорных колебаний является важнейшим узлом многих радиотехнических устройств (радиостанции, сотовые телефоны, системы навигации и т.д.) и различных вычислительных систем. В настоящее время основную долю рынка малогабаритных малопотребляющих источников опорных колебаний занимают термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ), обеспечивающие относительную температурную нестабильность частоты $1 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-6}$.

Вопросы построения термокомпенсированных генераторов с использованием кварцевых резонаторов на основе *дискретной* элементной базы исследовались в работах Г.Б. Альтшуллера, Н. Н. Елфимова, В. Г. Шакулина, В. В. Шувалова, Ю. С. Иванченко, А.В. Косых, С.А. Завьялова, А.Н. Лепетаева, а за рубежом – М. Фреркингем, М. Блохом, В. Гозлингом, Т. Адачи, Р. Филлером и др.

Возрастающие требования миниатюризации и ограничения энергопотребления, предъявляемые к разрабатываемой аппаратуре, вызывают необходимость поиска новых технических решений, направленных на достижение высоких параметров генератора при меньших габаритах. Существенное сокращение габаритов может быть достигнуто за счет полной интеграции схемы генератора в виде «системы на кристалле». Вместе с тем, создание высокостабильных источников опорной частоты в виде единой микросхемы сопряжено с рядом проблем. В частности, размеры кварцевого резонатора слишком велики относительно других элементов микросхемы; технология изготовления таких резонаторов не сочетается с технологией изготовления кремниевых подложек и при этом в лучшем случае можно говорить о «системе в корпусе»; технологические ограничения при производстве интегральных микросхем не позволяют создавать конденсаторы с большим значением емкости, интегрированные высококачественные варикапы, необходимые для перестройки частоты, и др.

Одним из перспективных решений по созданию интегральных генераторов является использование *микро-электро-механических* (МЭМС) резонаторов, технология изготовления которых может быть интегрирована в общий цикл производства микросхемы, однако температурная стабильность частоты таких резонаторов невелика, а схемотехника возбуждающих систем разработана недостаточно полно. В отечественной научной литературе вопросы создания высокостабильных генераторов на основе МЭМС практически отсутствуют. Отсутствие наработок в области создания высокостабильных интегральных опорных генераторов приводит к зависимости от зарубежных поставщиков, что ставит под угрозу нашу технологическую безопасность. В этом плане работа является очень актуальной.

Наибольший интерес представляет решение таких задач, как разработка методов термокомпенсации малогабаритных кварцевых резонаторов, пригодных для создания генератора в виде «система в корпусе», разработка схем возбуждения МЭМС резонаторов, обеспечивающих низкий уровень шумов, разработка принципов управления частотой интегральных кварцевых генераторов, разработка принципов термокомпенсации кварцевых генераторов.

Необходимость проведения этих исследований определила выбор темы и цели диссертационной работы.

Цель работы. Целью диссертационной работы является решение ряда проблем, связанных с созданием интегральных источников опорной частоты без внешних навесных элементов, имеющих малое значение температурной нестабильности частоты в расширенном диапазоне температур и низкий уровень шума выходного сигнала. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие конкретные задачи:

- Разработать принципы повышения температурной стабильности кварцевых и МЭМС генераторов, пригодные для реализации в виде интегральной БИС;
- Разработать и исследовать принципы управления частотой интегральных генераторов с использованием удобных для реализации в виде единого кристалла элементов (без внешних варикапов);
- Разработать и исследовать схемы возбуждения МЭМС резонаторов;
- Исследовать схемы интегральных КГ и МЭМС генераторов;
- Исследовать шумовые характеристики интегральных генераторов и предложить методы их улучшения;
- Разработать практические схемы интегральных ТККГ и МЭМС генераторов;

Методы исследований. При выполнении работы были использованы: теория радиотехнических цепей и сигналов; теория математического моделирования; методы анализа переходных процессов (метод Гира, метод Эйлера, метод трапеций), методы моделирования электронных схем на основе программы SpectreRF (PSS-анализ, анализ фазовых шумов и др.).

Научная новизна. В работе решены научные задачи, новизна которых заключается в следующем:

- предложен способ гибридной температурной компенсации интегрального кварцевого генератора с использованием программно-конфигурируемых полиномиальных коэффициентов;
- определена оптимальная ширина температурного поддиапазона для гибридной аналого-цифровой температурной компенсации с программно-конфигурируемыми полиномиальными коэффициентами;
- разработана схема дифференциального кварцевого ГУН, обладающая большей температурной стабильностью, чем широко распространенная схема Пирса при сопоставимом уровне шумов;
- предложен способ перестройки частоты дифференциального кварцевого генератора с помощью цепей подстройки частоты, содержащих последовательно включенные ёмкость и МОП транзистор;
- разработана схема МЭМС генератора на трансимпедансном усилителе, отличающаяся активной компенсацией искажений системы ограничения уровня выходного сигнала.

Практическая значимость результатов исследований:

- применение способа гибридной аналого-цифровой термокомпенсации позволяет на порядок уменьшить ошибку компенсации частоты по сравнению с применяемыми методами аналоговой термокомпенсации при сохранении низкого уровня фазовых шумов;
- разработанная топология интегрального генератора с МЭМС позволяет организовать промышленный выпуск изделия;
- способ управления частотой генератора за счет изменения сопротивления цепи подстройки позволяет снизить занимаемую площадь кристалла и уменьшить его стоимость в массовом производстве;

Реализация результатов работы. Работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы. Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в ходе выполнения работ по ряду НИОКР на проведение исследований по созданию ТККГ и МЭМС генераторов с высокой ударной стойкостью (до 30000 G),

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы получили положительную оценку при обсуждении на научно-технических конференциях различного ранга:

- на 22-м Европейском форуме по частоте и времени IEEE (Безансон, Франция, 2009);
- на Международной конференции Функциональная компонентная база микро-, опто-, и наноэлектроники (Харьков – Кацевелли, Украина, 2010);
- на 10-ой международной научно-практической конференции Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности (Санкт-Петербург, Россия, 2010);
- на 2-ой Региональной научно-практической конференции Омский регион – месторождение возможностей (Омск, Россия, 2011);
- на региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио (Омск, Россия, 2011);
- на 14-ой международной конференции молодых ученых по волновой электронике и её применению в информационных и телекоммуникационных системах (Санкт-Петербург, Россия, 2011);
- на региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио (Омск, Россия, 2012);

- на 8-ой международной научно-технической конференции Динамика систем, механизмов и машин (Омск, Россия, 2012);
- на региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио (Омск, Россия, 2014);
- на 17-ой международной конференции молодых ученых по волновой электронике и её применению в информационных и телекоммуникационных системах (Санкт-Петербург, Россия, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них: 4 статьи в научно-технических журналах «Омский научный вестник» и «Ползуновский вестник», включенных в перечень ВАК; 9 текстов докладов на международных конференциях; 5 текстов докладов на региональных конференциях; свидетельство о государственной регистрации топологии ИМС.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ гибридной термокомпенсации с цифровым перепрограммированием полиномиальных коэффициентов.
2. Структура микросхемы ТККГ.
3. Схема интегрального ГУН без внешних элементов подстройки.
4. Схема МЭМС генератора на основе трансимпедансного усилителя.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 155 наименований, и приложения. Работа изложена на 137 листах машинописного текста, содержит 74 рисунка, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагается цель и основные задачи исследования, формулируется научная новизна, практическая ценность полученных результатов, дается краткое описание содержания глав диссертации.

В первой главе систематизированы известные исследования в области разработки интегральных источников опорной частоты. Описаны основные виды интегральных источников опорной частоты: релаксационные генераторы, кольцевые генераторы, LC генераторы, генераторы с пьезоэлектрическим резонатором и МЭМС резонатором. Показаны их характеристики и области применения. Проведена классификация методов температурной компенсации отклонения частоты, обусловленных изменением резонансных частот пьезоэлектрических и МЭМС резонаторов. В таблице 1 приводится сравнение основных видов генераторов опорной частоты в интегральном исполнении.

Таблица 1– Сравнение КМОП, МЭМС и кварцевых генераторов

Характеристика	LC - КМОП генераторы	МЭМС генераторы	Кварцевые генераторы
Диапазон частот	кГц - ГГц	кГц - ГГц	кГц - ~ 100 МГц
Диапазон подстройки	>10 %	0,01 - 10 %	<0,1 %
Температурная зависимость частоты, $10^{-6} \cdot f^{\circ}\text{C}$	~200 (после компенсации)	5 - 60	0,1 - 10
Добротность	<20	>10 ⁴	>10 ⁴
Результирующая ошибка частоты	~20 %	~0,2 %	0,005 - 0,1 %
Потребляемая мощность	~1 мВт	~10 мВт	~100 мВт
Занимаемая площадь кристалла	~0,1 мм ²	~1 мм ²	>10 мм ²

Из таблицы следует увеличение стабильности частоты опорного колебания при переходе от КМОП генераторов к кварцевым генераторам, в то же время наблюдается увеличение потребляемой мощности и размеров и снижение диапазона подстройки. МЭМС генераторы могут быть оптимизированы для достижения больших значений перестройки или лучшей стабильности.

На рисунке 1 показаны способы температурной компенсации генераторов опорной частоты, реализуемых в интегральном исполнении.

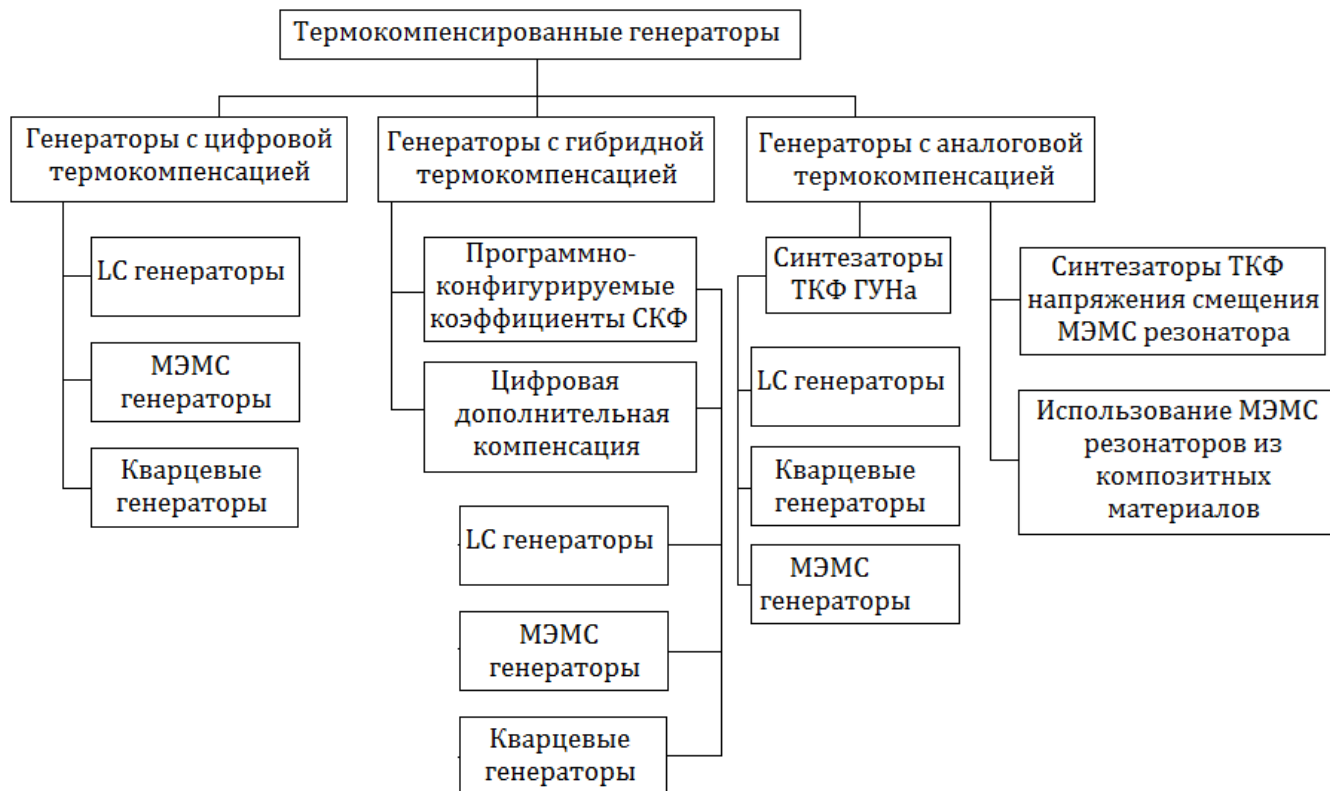


Рисунок 1 – Классификация способов температурной компенсации источников опорных колебаний

Ввиду возрастающих требований к стабильности частоты и уровню фазовых шумов, миниатюризации и уменьшению энергопотребления, наиболее перспективными являются кварцевые и МЭМС генераторы, обеспечивающие выигрыш более 20 дБ по уровню фазовых шумов при отстройке от несущей 1кГц и более. В то же время относительная температурная нестабильность типового МЭМС резонатора без технологической компенсации (применение оксидов, обладающих температурным коэффициентом другого знака) составляет порядка $\pm (30 \dots 60) \cdot 10^{-6} \cdot f / ^\circ\text{C}$. Температурная нестабильность кварцевых генераторов с аналоговой термокомпенсацией не превышает $\pm (1 \dots 5) \cdot 10^{-6} \cdot f$.

В конце раздела сформулированы задачи исследования: исследование и разработка схем генераторов, позволяющих интегральную реализацию, выбор метода изменения частоты ГУН без применения внешних варикапов, исследование принципов минимизации уровня фазовых шумов, разработка схемотехники МЭМС генераторов, системы минимизации искажений выходного сигнала генератора.

Во второй главе исследуются вопросы увеличения температурной стабильности интегральных кварцевых генераторов. Генераторы с величиной относительной нестабильности порядка $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ и менее могут быть реализованы с использованием принципов цифровой и аналоговой термокомпенсации. Существенным недостатком цифровых методов температурной компенсации является повышенный уровень фазовых шумов выходного сигнала, обусловленный дискретным принципом работы ЦАП. На рисунке 2 представлены результаты моделирования фазовых шумов ГУНа при переключении младшего разряда 12 битного ЦАП.

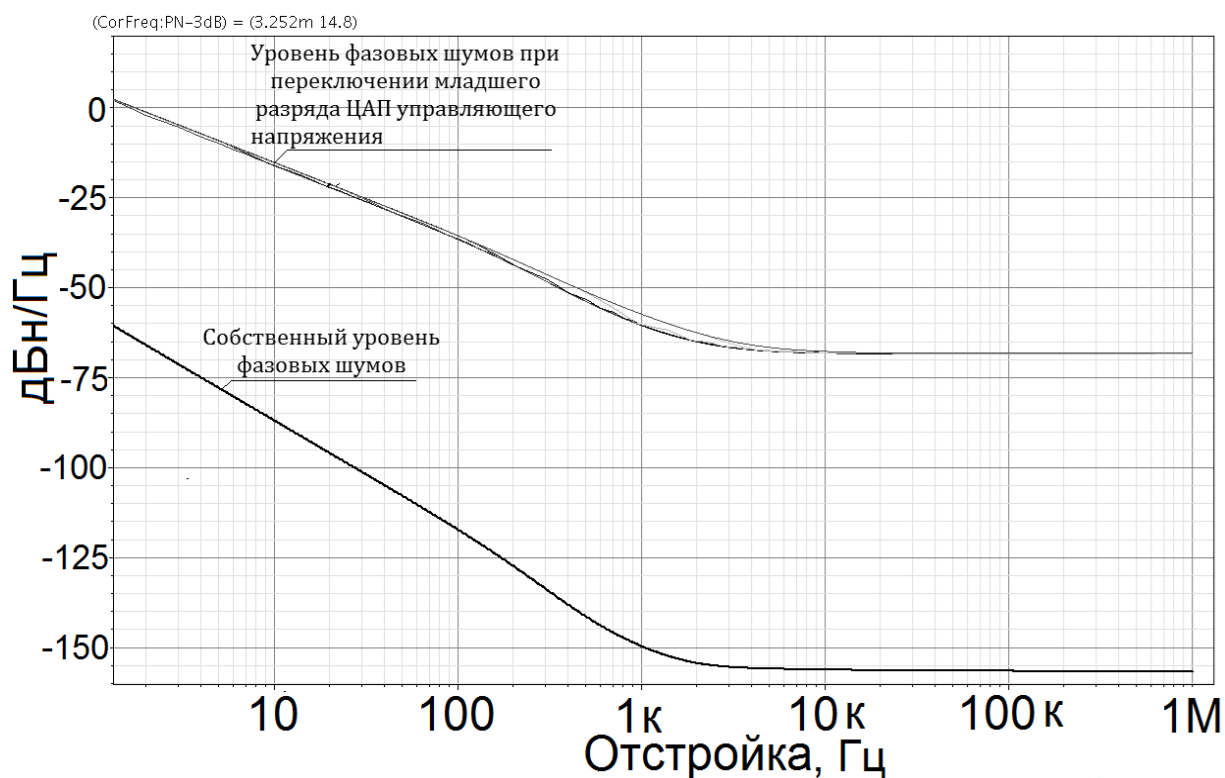


Рисунок 2 – Уровень фазовых шумов ГУН при переключении младшего разряда 12-битного ЦАП

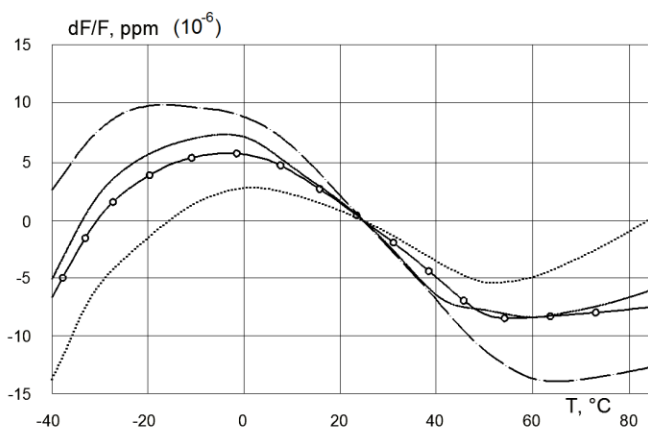


Рисунок 3 – Технологический разброс ТЧХ резонаторов АТ среза

ским разбросом параметров резонаторов. Резонаторы АТ – среза с одним и тем же углом среза имеют большой технологический разброс, достигающий $15 \cdot 10^{-6} \cdot f$ (рисунок 3), что осложняет применение синтезатора компенсирующей функции третьего порядка с постоянными коэффициентами полиномиальной функции. На рисунке 4(а) приводится усредненная ТЧХ нескольких кварцевых резонаторов (штрихпунктирная линия) и полиномиальная компенсирующая функция третьего порядка (сплошная линия). На рисунке 4(б) показан пример ошибки для конкретных экземпляров резонаторов при компенсации среднестатистической полиномиальной функцией вида:

$$f(T) = a + b(T) + c(T^2) + d(T^3) \quad (1)$$

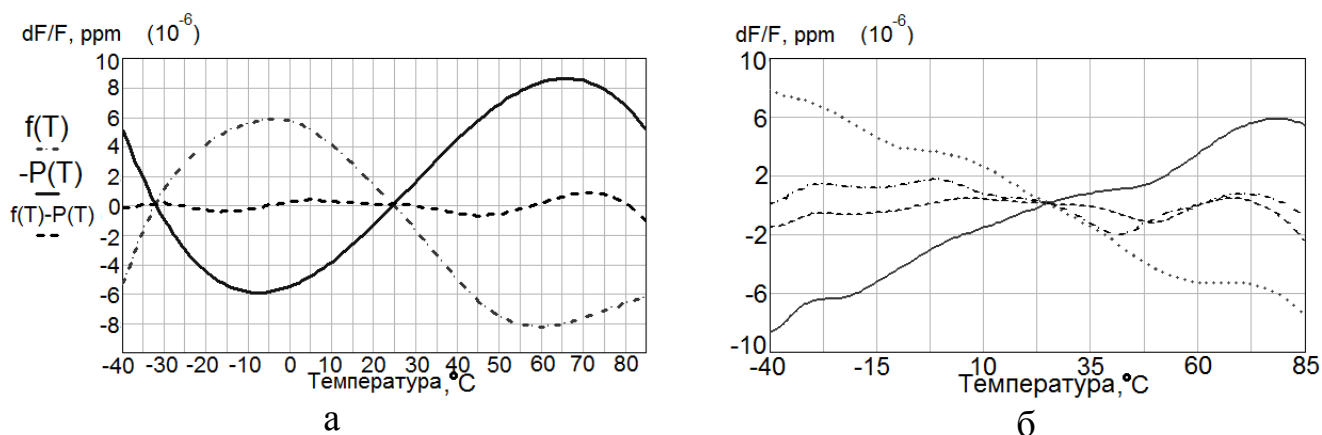


Рисунок 4 – Среднестатистическая ТЧХ с компенсирующей функцией (а) и величина ошибки для конкретных резонаторов (б)

Произведена оценка разбросов коэффициентов аппроксимирующего компенсирующую функцию полинома, обеспечивающего полную компенсацию.

Предложен способ гибридной аналого-цифровой температурной компенсации, в основу которого положен синтезатор полиномиальной термокомпенсирующей функции четвертого порядка с программно-конфигурируемыми полиномиальными коэффициентами. Для достижения минимального уровня фазовых шумов, увеличе-

нием которых сопровождается работа цифровых схем термокомпенсации, оптимальным решением является разбивка температурного диапазона на поддиапазоны и использование аналогового синтезатора компенсирующей функции с перепрограммированием полиномиальных коэффициентов при переходе из одного температурного поддиапазона в другой.

$$f(T) = \begin{cases} a_1 + b_1(T) + c_1(T^2) + d_1(T^3) + i_1(T^4) & \text{при } T_0 \leq T < T_1 \\ a_2 + b_2(T) + c_2(T^2) + d_2(T^3) + i_2(T^4) & \text{при } T_1 \leq T < T_2 \\ \dots & \\ a_n + b_n(T) + c_n(T^2) + d_n(T^3) + i_n(T^4) & \text{при } T_{n-1} \leq T \leq T_n \end{cases} \quad (2)$$

Анализ показывает, что оптимальной является разбивка температурного диапазона на диапазоны шириной 25 °С и применение полиномиальной функции четвертого порядка. Применение полиномиальных функций более высоких порядков и дальнейшее уменьшение ширины температурных поддиапазонов не приводит к увеличению *реальной* точности термокомпенсирующей функции.

В таблице 2 приводится сравнение основных методов термокомпенсации.

Таблица 2 – Характеристики методов температурной компенсации

№	Метод компенсации	Погрешность метода 10 ⁻⁶	Использование цифровых блоков
1	Аналоговая компенсация кубическим полиномом с типовыми коэффициентами	5...8	Не используются
2	Аналоговая компенсация с настраиваемыми полиномиальными коэффициентами	1...2	В момент включения
3	Кусочно-полиномиальная с использованием полинома четвертой степени	≤ 0,1	В моменты включения, переключения рабочего поддиапазона
4	Кусочно-полиномиальная с использованием полинома четвертой степени с цифровой «докомпенсацией»	≤ 0,01	Непрерывное

Предложенный метод термокомпенсации реализован при разработке структурной схемы универсального интегрального кварцевого генератора с гибридной аналого-цифровой термокомпенсацией. Гибкая функциональность схемы позволяет получать опорную частоту с различными значениями температурной стабильности, малым энергопотреблением, низким уровнем фазовых шумов, свойственным аналоговым схемам термокомпенсации, возможностью компенсации технологического разброса резонаторов. Структурная схема генератора приведена на рисунке 5.

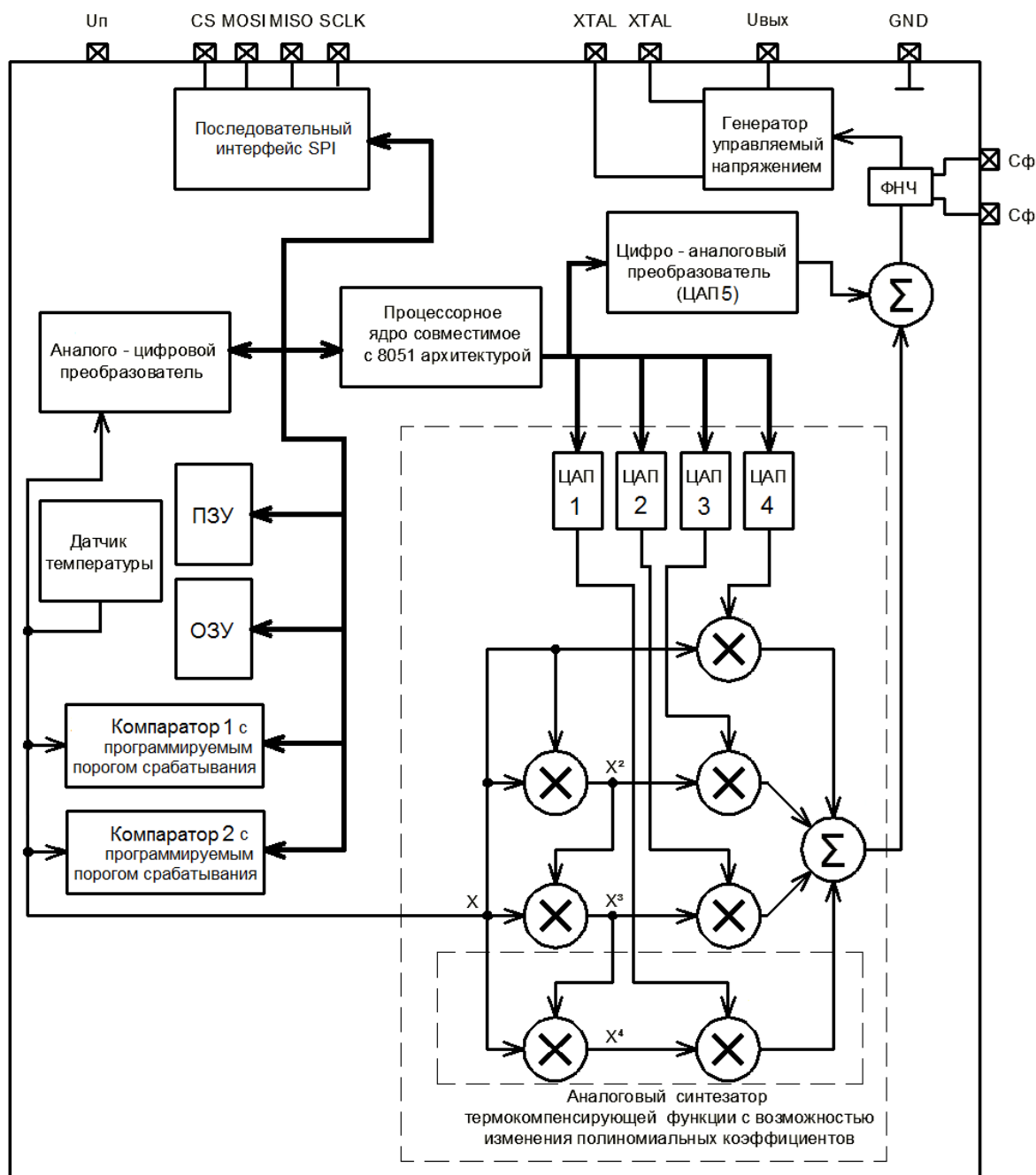


Рисунок 5 – Структурная схема универсального интегрального термокомпенсированного генератора

Схема состоит из цифровой части, содержащей интерфейсы, микроконтроллерное ядро на основе открытой (свободно распространяемой) архитектуры 8051, энергонезависимую память и аналоговой части, содержащей датчик температуры, аналого-цифровой преобразователь, несколько цифро-аналоговых преобразователей и сложно-функциональный блок – синтезатор термокомпенсирующей функции, позволяющий синтезировать полиномиальную компенсирующую функцию четвертого порядка. В структурной схеме применяется пять цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), что обусловлено различными диапазонами значений, которые могут принимать полиномиальные коэффициенты, соответственно ЦАПы имеют различные диапазоны выходного напряжения. Аналоговые умножители и сумматоры, входящие в СКФ, обладают конечной точностью вычисления. Определено влияние этой

погрешности на общую точность термокомпенсации. При величине ошибок операции умножения 0,3 % и операции суммирования величиной 0,1 % результирующая ошибка синтезируемой функции термокомпенсации может быть определена путем суммирования ошибок умножителей и сумматоров, накапливаемых при формировании сигнала термокомпенсации. Максимальное отклонение функции термокомпенсации наблюдается на краях температурного диапазона и не превышает $0,2 \cdot 10^{-6} \cdot f$ и может быть уменьшено путём коррекции полиномиальных коэффициентов.

Способ гибридной аналого-цифровой температурной компенсации, использующий кусочно-полиномиальную аппроксимацию, позволяет получить ошибку частоты не более $0,1 \cdot 10^{-6}$, при малом уровне фазовых шумов, характерном для аналоговых систем термокомпенсации.

В третьей главе исследуются интегральные ГУНЫ, обеспечивающие перестройку, необходимую для термокомпенсации кварцевых генераторов.

Ввиду отсутствия традиционных варикапов в широко распространенных технологических процессах, при разработке генераторов в интегральном исполнении возникает проблема осуществления перестройки частоты. Для реализации перестройки одним из вариантов является использование емкости затвора МОП транзистора. На рисунке 6 представлена схема генератора Пирса, перестройка которого реализована с использованием управляемых ёмкостей МОП транзистора.

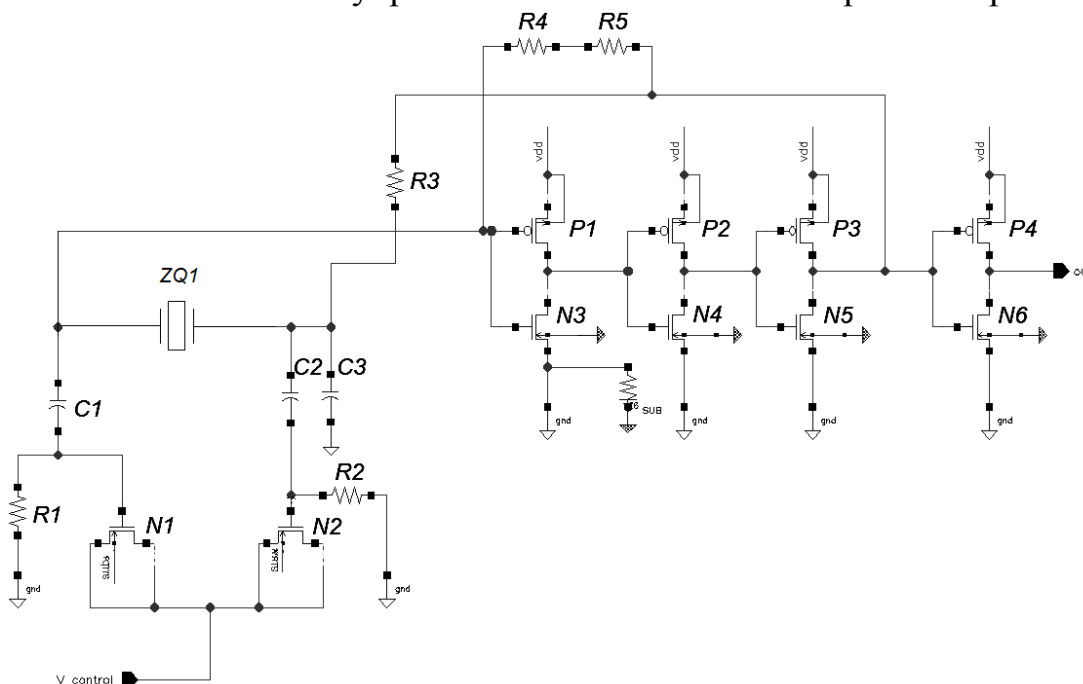


Рисунок 6 – Схема электрическая принципиальная генератора Пирса

Генератор состоит из трех инверторов P1-N3, P2-N4, P3-N5. Буферный каскад выполнен на дополнительном инверторе P4-N6. Подстройка частоты ГУНа осуществляется путем изменения емкостей затворов транзисторов N1, N2. Ёмкости C1, C2 являются разделительными. Сопротивления R1, R2 обеспечивают указанный выше режим работы транзисторов в отсечке.

На рис. 7 представлена характеристика управления генератора.

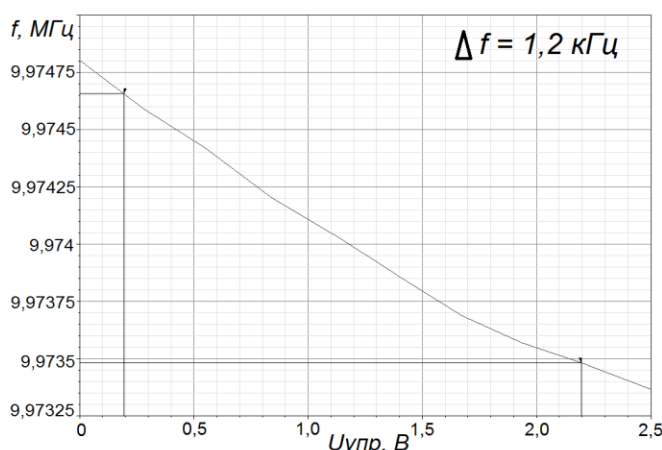


Рисунок 7 – Характеристика управления ГУНа

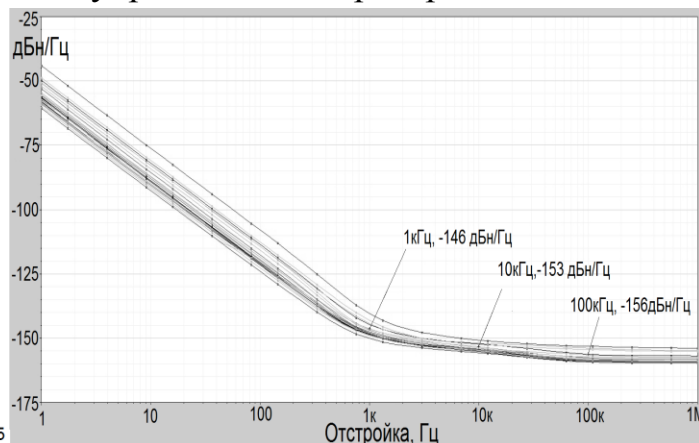


Рисунок 8 – Результаты анализа фазовых шумов ГУН при статистическом разбросе параметров техпроцесса

Как видно из рисунка 7, характеристика управления обладает неплохой линейностью (нелинейность 8,3%). Результаты исследования фазовых шумов ГУН в стационарном режиме кусочно-полиномиальным методом компьютерного моделирования представлены на рисунке 8. На отстройке 1 кГц величина фазовых шумов не превышает минус 146 дБ. При отстройке 10 кГц фазовые шумы не превышают минус 153 дБ, что соизмеримо с лучшими образцами генераторов с аналоговой термокомпенсацией, выпускаемых промышленностью.

Для интегрального исполнения часто используется схема дифференциального кварцевого генератора (рисунок 9). Генератор основан на двух усилительных каскадах, охваченных перекрестными положительными обратными связями. Перестройка рассматриваемых генераторов возможна путем изменения величины тока источников I_1 , I_2 или же изменением величины нагрузочных емкостей, подключаемых к выходам генератора. Величина тока источников тока, реализованных на n-канальных МДП транзисторах может изменяться путем изменения приложенного к затвору

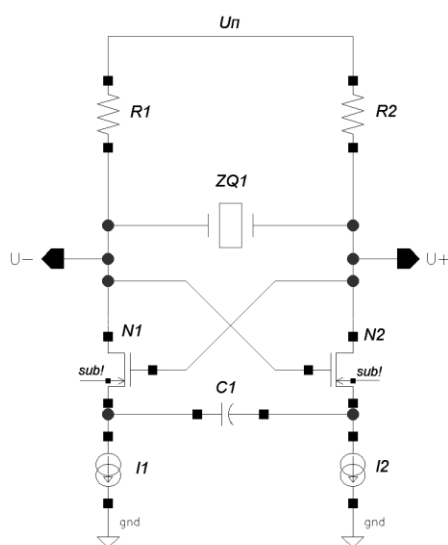


Рисунок 9 – Дифференциальный кварцевый генератор

напряжения в интервале 200...300 мВ, при этом изменение частоты составит порядка $1000 \cdot 10^{-6} \cdot f$.

Способ изменения частоты выходного сигнала, основанный на изменении емкости затвора полевого транзистора в области отсечки связан с проблемой большой начальной емкости затвора, составляющей порядка 200 % от всего диапазона изменения емкости. В итоге схема оказывается перегруженной и не возбуждается. На рисунке 10 приводится схема ГУН на основе модифицированного дифференциального кварцевого генератора. Применение пары р-канальных транзисторов P3, P5 позволяет уменьшить уровень шумов выходного сигнала, резисторы R1 и R2 (схема на рисунке 9) замене-

ны на активную нагрузку N2, N3.

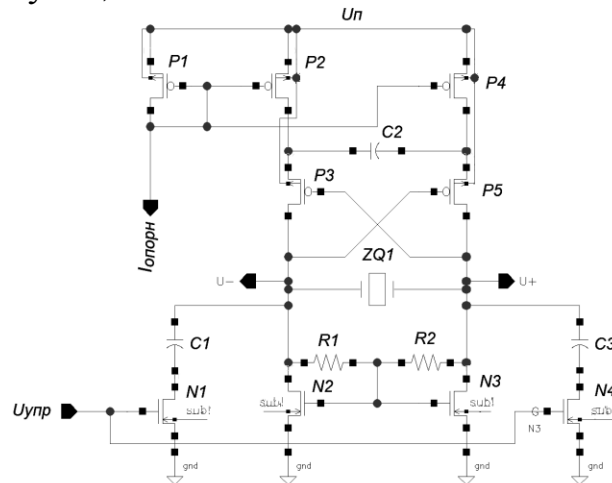


Рисунок 10 – Схема дифференциального кварцевого ГУН

Сопротивление цепей C1, N1 и C3, N4, обеспечивающих подстройку ГУН, может быть выражено:

$$Z = r_{SD} + 1/\omega C, \quad (4)$$

где r_{SD} - сопротивление канала транзистора. Выражение (4) может быть переписано:

$$Z = \frac{1}{\mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{th} - U_{DS}) \cdot \left(1 + \frac{2U_{DS}}{\lambda}\right) + \frac{\mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} U_{DS}^2}{2\lambda}} + 1/\omega C \quad (5)$$

где μ_n - подвижность носителей, C'_{ox} - ёмкость подзатворного диэлектрика на единицу площади, W и L – ширина и длина транзистора, U_{GS} - напряжение затвор – исток, U_{th} - пороговое напряжение, U_{DS} - напряжение сток-исток, λ - параметр модуляции длины канала.

Характеристика управления генератором приведена на рисунке 11.

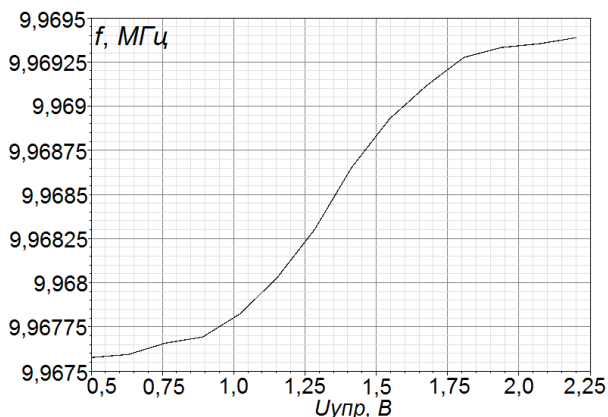


Рисунок 11 – Характеристика управления дифференциального кварцевого ГУН

При изменении управляющего напряжения от 900 мВ до 1800 мВ частота генератора перестраивается на 1,6 кГц, что достаточно для компенсации температурного отклонения частоты кварцевого резонатора. Управляющая характеристика на этом участке наиболее линейна (нелинейность не более 7,9%) и имеет максимальную крутизну. Ошибка при аппроксимации управляющей функции кубическим полиномом не превышает ± 14 Гц. Сопротивление канала полевого транзистора изменяется при изменении темпе-

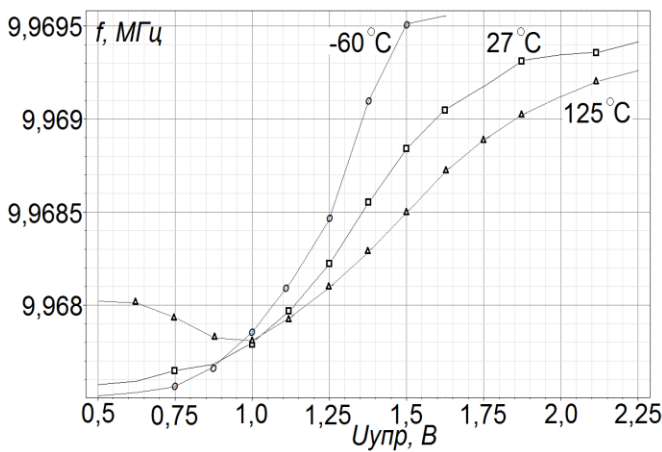


Рисунок 12 – Перестройка ГУН при температурах минус 60, 27 и 125 °С

Выявленная температурная зависимость должна учитываться при синтезе компенсирующей функции.

Предложенные способы позволяют осуществлять перестройку частоты ГУН, перекрывающие температурное отклонение частоты кварцевых резонаторов.

В четвертой главе, с использованием средств компьютерного моделирования исследованы вопросы практической реализации МЭМС генератора на основе трансимпедансного усилителя, преобразующего выходной ток МЭМС резонатора в напряжение. Структурная схема генератора представлена на рисунке 13.

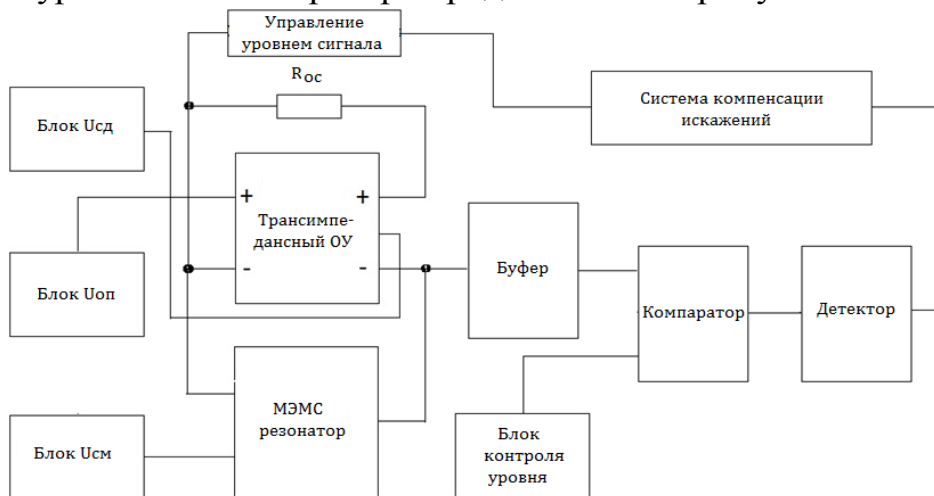


Рисунок 13 – Структурная схема МЭМС генератора на трансимпедансном усилителе с контролем уровня выходного сигнала

Блок Усд формирует напряжение середины диапазона выходного напряжения трансимпедансного усилителя. Блок Уоп формирует постоянное напряжение смещения неинвертирующего входа усилителя. Блок Усм формирует постоянное напряжение смещения для МЭМС резонатора. Блок контроля уровня задает размах выходного сигнала генератора, компаратор, буфер, детектор, система компенсации искажений и блок управления уровнем сигнала генератора, обеспечивающий регулировку глубины отрицательной обратной связи, охватывающей усилитель. На рисунке 14 представлена схема электрическая принципиальная МЭМС генератора, за исключением блоков опорных токов и напряжений.

ратуры, что обусловлено температурными зависимостями параметров μ_n и U_{th} :

$$\mu_n(T) = \mu_n(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1,5} \quad (6)$$

$$\frac{dU_{th}}{dT} = \left(1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{U_{inv}}} \right) \frac{dU_{inv}}{dT} \quad (7)$$

Рисунок 12 иллюстрирует температурную зависимость цепочки подстройки частоты дифференциального кварцевого ГУН.

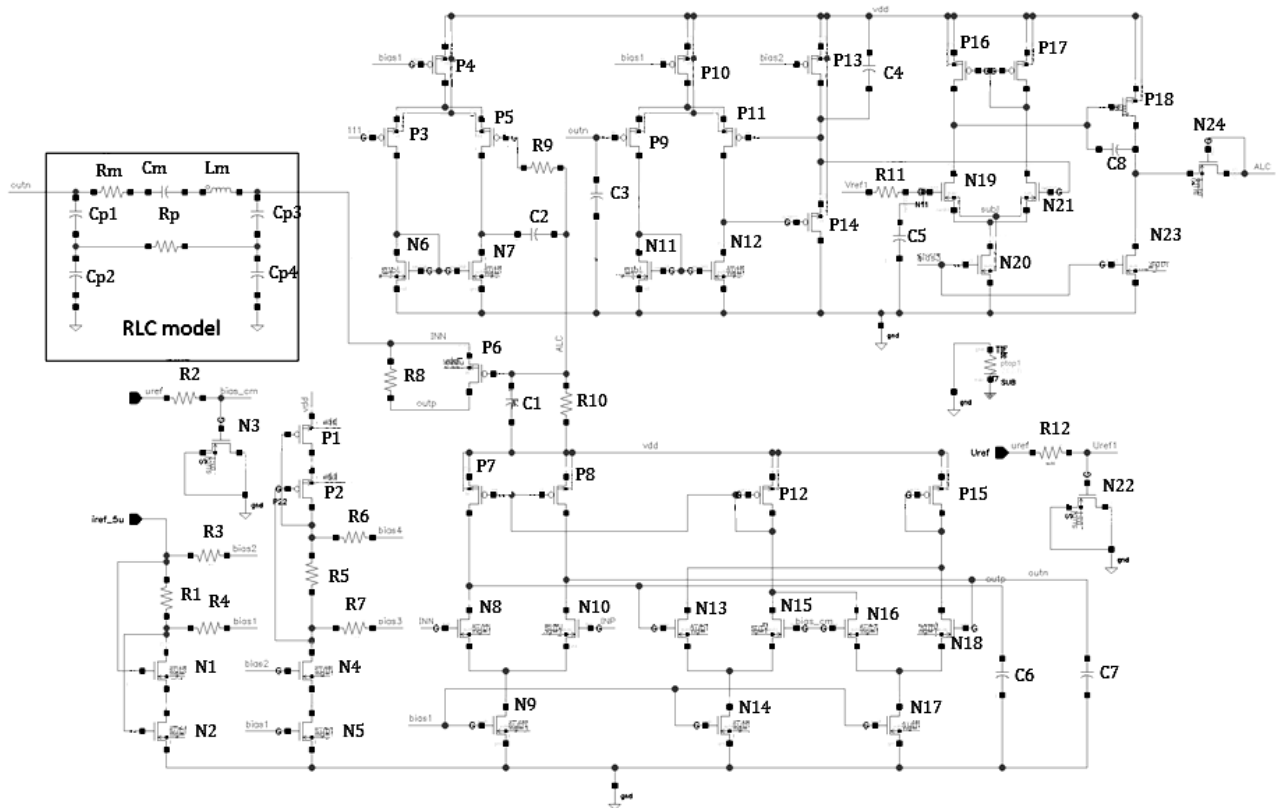


Рисунок 14 – Схема электрическая принципиальная МЭМС генератора на трансимпедансном усилителе с контролем уровня выходного сигнала

На рисунках 15 и 16 представлены результаты анализа схемы во временной области и фазовых шумов в установившемся режиме кусочно-полиномиальным методом компьютерного моделирования соответственно.

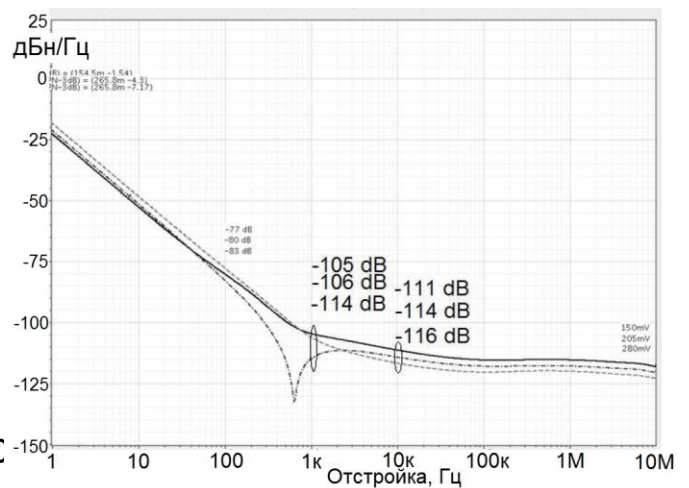
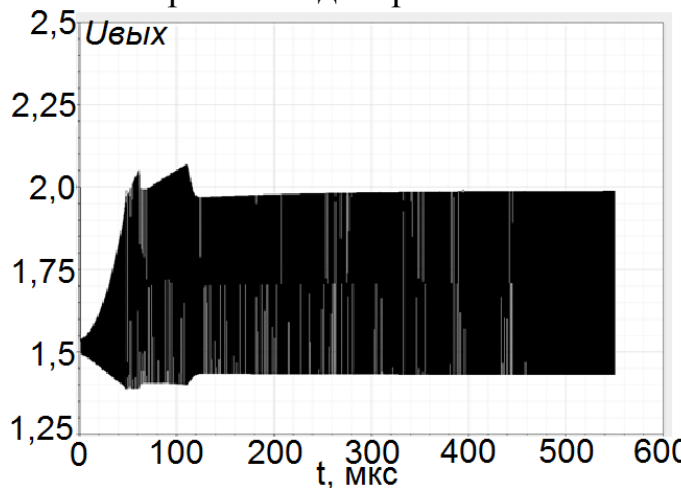


Рисунок 15 Результаты анализа МЭМС генератора во временной области

Рисунок 16 Результаты анализа фазовых шумов генератора

Система автоматической регулировки уровня модулирует выходной сигнал генератора частотой 5 МГц. Подавление паразитной модуляции связано с проблемами увеличения потребляемой мощности и занимаемой конденсаторами площади кристалла. Предложен способ активной компенсации паразитной модуляции, основанный на стабилизации управляющего сигнала активного сопротивления.

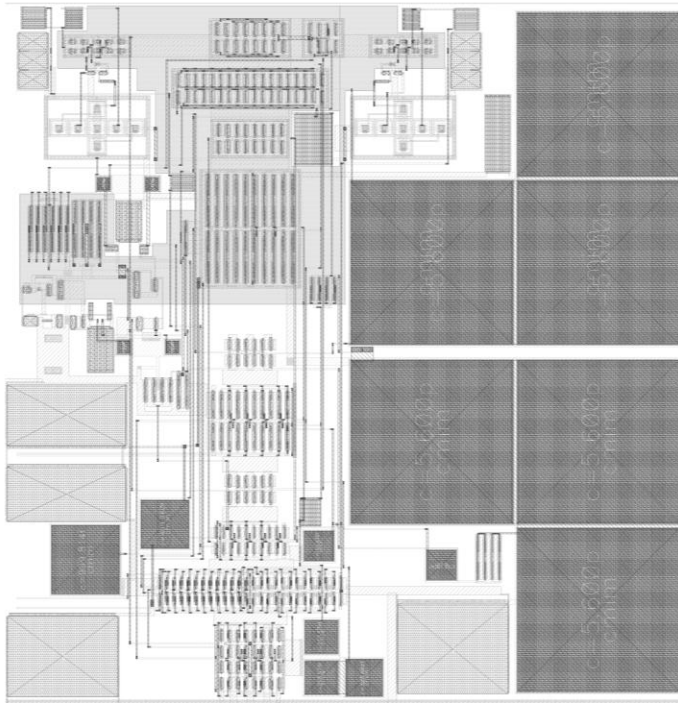


Рисунок 17 – Топологическое представление МЭМС генератора на основе трансимпедансного усилителя

Топологическое представление разработанного МЭМС генератора приведено на рисунке 17.

Применение активной компенсации искажений, вносимых системой автоматической регулировки уровня выходного сигнала, позволяет более чем на порядок уменьшить паразитную модуляцию выходного сигнала генератора сигналом системы ограничения уровня выходного сигнала

В заключении кратко формулируются основные результаты, полученные в настоящей работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан новый способ гибридной аналого-цифровой температурной компенсации, использующий кусочно-полиномиальную аппроксимацию, что позволяет уменьшить ошибку компенсации частоты до $0,1 \cdot 10^{-6}$, при малом уровне фазовых шумов, характерном для аналоговых систем термокомпенсации.
2. Разработана и исследована и структурная схема гибридной температурной компенсации кварцевых генераторов.
3. Установлено, что для предлагаемого способа полиномиальной аппроксимации с перепрограммируемыми полиномиальными коэффициентами оптимальной является ширина температурного поддиапазона 25°C .
4. Исследованы схемы интегральных КГ и МЭМС генераторов.
5. Создана схема дифференциального кварцевого ГУН, обладающая уровнем фазовых шумов, сравнимых со схемой генератора Пирса, при большей температурной стабильности частоты.
6. Большая начальная ёмкость затвора МОП-транзистора исключает его использование в качестве элемента подстройки частоты дифференциального ГУН.
7. Предложен способ перестройки частоты дифференциального кварцевого генератора с помощью цепей подстройки частоты, содержащих последовательно включенные ёмкость и МОП транзистор;
8. Получено выражение для сопротивления цепи подстройки дифференциального ГУН.

9. Разработана практическая схема интегрального МЭМС генератора, отличающаяся активной компенсацией искажений системы ограничения уровня выходного сигнала.
10. Компенсация искажений системы автоматической регулировки уровня выходного сигнала МЭМС генератора увеличивает чистоту выходного сигнала и снижает уровень фазовых шумов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Косых, А.В. Моделирование полупроводникового датчика температуры, используемого в интегральных системах температурной стабилизации частоты источников опорных колебаний / А. В. Косых, С. А. Завьялов, К. В. Мурасов // Ползуновский вестник – Барнаул, 2011 – №3/1 – С. 43 – 47
2. Косых, А. В. Моделирование источника тока с управляемым температурным коэффициентом для применения в интегральных термокомпенсированных кварцевых генераторах / А. В. Косых, С. А. Завьялов, А.Н. Лепетаев, К. В. Мурасов // Омский научный вестник – Омск, 2011 – №2 (100) – С. 219 – 222
3. Лепетаев, А.Н. Интегральный ASIC кварцевый генератор с гибридной аналого-цифровой температурной компенсацией / А. Н. Лепетаев, А. В. Косых, С. А. Завьялов, К. В. Мурасов // Омский научный вестник, 2011 №3(103) – С. 294 – 299
4. Мурасов, К. В. Микросхема МЭМС генератора опорной частоты на основе трансимпедансного усилителя / К. В. Мурасов // Ползуновский вестник – Барнаул, 2014 (в печати)

Свидетельства

5. Мурасов, К. В. МЭМС генератор на основе трансимпедансного усилителя / К. В. Мурасов, А. В. Косых, С. А. Завьялов, А. Н. Лепетаев, Р. Р. Фахрутдинов // Свидетельство о государственной регистрации топологии ИМС № 2014630071. Зарегистрировано в реестре топологий ИМС 01.10.2014 г.
6. Мурасов, К. В. Термокомпенсированный кварцевый генератор для синхронизации систем радиосвязи / К. В. Мурасов, С. А. Завьялов, А. Н. Лепетаев, А. В. Косых, И. В. Хоменко // Заявка на патент на полезную модель № 2014139340

Публикации в других изданиях

7. Zavyalov, S. A. The method of modeling of VCO based on SPICE simulation / S. A. Zavyalov , A. N. Lepetaev, K. V. Murasov, A. V. Kosykh // Proc. Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE International. Besancon, France, 20-24 April 2009, pp. 978-981.
8. Косых, А. В. Построение высокоэффективных источников опорных колебаний с использованием современной функциональной компонентной базы

- /А. В. Косых, И. В. Хоменко, К. В. Мурасов //Функциональная компонентная база микро-, опто-, и наноэлектроники: Сб. науч. тр. международной конференции. Харьков -Кацевели 2010. – С 258-260.
9. Мурасов, К. В. Применение генераторов термокомпенсирующей функции при разработке стабильных источников опорных колебаний на основе кварцевых резонаторов / К. В. Мурасов, А. В. Косых, И. В. Хоменко //Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. Материалы десятой международной научно-практической конференции. СПб 2010. – С. 217 – 221.
 10. Мурасов, К. В. Микроминиатюрный кварцевый генератор с аналоговой температурной компенсацией /К. В. Мурасов //Омский регион – месторождение возможностей: Материалы II Региональной научно-технической конференции. Омск 2011. – С. 134 – 136.
 11. Мурасов, К. В. Источники тока с заданными параметрами температурной стабильности, применяемые в интегральных термокомпенсированных генераторах / К. В. Мурасов, С. А. Завьялов, А. Н. Лепетаев //Наука, образование, бизнес: Материалы региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2011. – С. 187 – 188.
 12. Мурасов, К. В. Принципы построения ASIC сверхминиатюрных кварцевых генераторов с гибридной аналого-цифровой термокомпенсацией / К. В. Мурасов, А. В. Косых, А.Н. Лепетаев // Радиотехника, электроника и связь. Материалы международной научно-технической конференции. Омск: изд-во «Радиотехника», 2011. – С. 530 – 534.
 13. Murasov, K. V. Micro miniature temperature compensated crystal oscillator (TCXO) / K. V. Murasov // XIV International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg, 30 May – 03 June, 2011. p 35
 14. Мурасов, К. В. Линейный малошумящий усилитель для интегральных систем стабилизации частоты /К. В. Мурасов, А. В. Косых, С. А. Завьялов // Наука, образование, бизнес: Материалы региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2012. –С. 178 – 182.
 15. Мурасов, К. В. Современные интегральные источники опорных колебаний / К. В. Мурасов, А. В. Косых, Р. А. Вольф //Динамика систем, механизмов и машин. Материалы VIII международной научно-технической конференции. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – С. 270 – 273.
 16. Мурасов, К. В. Исследование модели IBAR МЭМС резонатора в среде Cadence / К. В. Мурасов, А. В. Косых, С. А. Завьялов, А.Н. Лепетаев, Р. Р. Фахрутдинов // Наука, образование, бизнес: Материалы региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2014. –С. 164 – 167.

17. Фахрутдинов, Р. Р. Прецизионный источник опорного напряжения с температурной компенсацией третьего порядка / Р. Р. Фахрутдинов, К. В. Мурасов, А. В. Косых, С. А. Завьялов, А.Н. Лепетаев // Наука, образование, бизнес: Материалы региональной научно-практической конференции ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во КАН, 2012. –С. 190 – 194.
18. Lepetaev, A. N. Optimization of the crystal oscillator excitation circuit by low phase noise criterion / A. N. Lepetaev, K. V. Murasov // XVII International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg, 1 – 5 June, 2014. p 33
19. Murasov, K. V. Integrated MEMS oscillator / K. V. Murasov, S. A. Zavyalov, A. V. Kosykh, A. N. Lepetaev // XVII International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg, 1 – 5 June, 2014. p 29
20. Fakhrutdinov, R. R. High precision 3-rd order temperature compensation voltage reference / R. R. Fakhrutdinov, K. V. Murasov, S. A. Zavyalov // XVII International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg, 1 – 5 June, 2014. p 24