

На правах рукописи



Карагусов Виктор Иванович

**УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ТЕРМОСТАТИРОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ**

Специальность 2.2.13. - Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Радиотехнические устройства и системы диагностики» и акционерном обществе «Омский научно-исследовательский институт приборостроения».

Научный руководитель:

Косых Анатолий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиотехнические
устройства и системы диагностики».

Официальные оппоненты:

Шакин Олег Васильевич,
доктор технических наук, старший научный со-
трудник, старший научный сотрудник феде-
рального государственного бюджетного учре-
ждения науки «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»;

Сафин Ансар Ризаевич,
кандидат технических наук, доцент, заведую-
щий кафедрой формирования и обработки ра-
диосигналов федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Национальный исследо-
вательский университет "МЭИ".

Ведущая организация:

Акционерное общество «ЛИТ-ФОНОН»,
г. Москва.

Защита состоится «06» апреля 2023 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.350.01, созданного на базе Омского государственного технического университета по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и в сети Интернет на сайте ОмГТУ – www.omgtu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск-50, пр. Мира, 11, учёному секретарю диссертационного совета 24.2.350.01.

Тел.: 8(3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.350.01
кандидат технических наук, доцент



С.А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Время готовности радиоэлектронной системы после включения является важной технической характеристикой и в ряде случаев определяется временем выхода на режим её опорного генератора, в качестве которого как правило используются прецизионные термостатированные кварцевые генераторы, обеспечивающие наилучшую долговременную и температурную стабильность среди генераторов на основе пьезоэлектриков. Готовность к работе при включении прецизионных термостатированных кварцевых генераторов (ТСКГ) ограничивается временем, необходимым для разогрева пьезоэлемента (ПЭ) от температуры окружающей среды до температуры статирования, которая должна быть выше максимальной рабочей температуры окружающей среды. Снижение этого времени является актуальной научно-технической задачей. Время установления частоты первых термостатированных генераторов исчислялось десятками минут. В дальнейшем это время неуклонно снижалось. Применение резонаторов-термостатов (РТ) с внутренним распределённым нагревателем ПЭ позволило снизить время установления частоты ТСКГ с нескольких минут до десятков секунд в широком диапазоне рабочих температур от -60°C до 70°C , однако для современных устройств этого недостаточно.

В исследование тепловых процессов в резонаторе-термостате в режиме разогрева и проблем уменьшения времени установления частоты термостатированных кварцевых генераторов внесли большой вклад работы Л.Е. Ивлева, А.Н. Дикиджи, И.В. Абрамзона, А.И. Куталёва, В.Я. Баржина, П.Е. Кандыбы, П.Г. Позднякова, А.В. Косых, И.В. Хоменко, Б. Хиллериха (B. Hillerich), О. Наглера (O. Nagler), К. Вайса (K. Weiss) и др.

Основная идея работы состоит в уменьшении времени установления частоты прецизионных ТСКГ за счёт оптимизации пространственного и временного распределения поля температур в термостате с двумя нагревателями в процессе его выхода на установившийся режим.

Для решения этой проблемы необходимо создать трёхмерную температурно-динамическую модель РТ, учитывающую комплекс конструктивных и физических факторов, влияющих на частоту генератора, определить зависимость частоты генерации от распределения температурного поля в зоне активных колебаний ПЭ и предложить технические решения, обеспечивающие требуемые параметры.

Объектом исследования диссертационной работы являются ТСКГ с РТ с распределённым нагревателем пьезоэлемента.

Предметом исследования диссертационной работы являются динамика температурного поля кварцевого ПЭ ТД-среза для прецизионных ТСКГ в режиме разогрева и время установления частоты таких генераторов.

Цель работы – поиск возможности и путей уменьшения времени установления частоты прецизионных термостатированных кварцевых генераторов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

- анализ конструктивных и физических факторов, влияющих на тепловые процессы в резонаторе-термостате;

- разработка аналитической пространственной температурно-динамической модели резонатора с распределённым подогревом ПЭ, учитывающей комплекс влияющих конструктивных и физических факторов и позволяющей определить время установления частоты генератора для любой конструкции РТ;
- разработка конструкции РТ для прецизионных ТСКГ с уменьшенным временем установления частоты резонатора при помощи исследования динамики температурного поля резонатора в режиме разогрева и расчётов частотно-временной характеристики генератора на разработанной модели;
- экспериментальные исследования прецизионных ТСКГ с РТ разработанной конструкции.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач используются:

- методы теории теплопроводности;
- методы численного моделирования;
- метод конечных элементов для решения дифференциальных уравнений в частных производных;
- экспериментальные методы исследований;
- методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

- предложена математическая пространственная температурно-динамическая модель РТ с распределённым подогревом ПЭ, комплексно учитывающая факторы, влияющие на динамику температурного поля в РТ, включая факторы теплоёмкости и теплопроводности, зависящих от изменения температуры, а также анизотропии материала ПЭ, и позволяющая определить динамику температурного поля в РТ в режиме разогрева для конкретной конструкции;
- получены аналитические зависимости частоты генерации РТ от распределения температурного поля РТ;
- предложена методика моделирования процессов распределения и установления температурного поля в пределах РТ, а также выходной частоты.

Теоретическая ценность работы заключается в том, что предложенная математическая трёхмерная тепловая модель позволяет описать тепловые процессы в РТ кварцевого генератора в режиме начального разогрева с учётом комплекса влияющих конструктивных и физических факторов, а также определить время установления частоты ТСКГ с необходимой точностью для любой конструкции РТ.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработанная модель позволяет при проектировании ТСКГ проводить тепловые расчёты резонаторов с заданными параметрами без необходимости трудоёмкого макетирования и, таким образом, ускорить их разработку при проведении НИОКР;
- предложенные методы моделирования резонатора-термостата позволяют на этапе проектирования определять режимы его работы, не допускающие

термического повреждения элементов конструкции и снижающие риски выхода генераторов из строя в процессе их эксплуатации;

- экспериментально показана достижимость времени установления частоты прецизионных ТСКГ в широком диапазоне рабочих температур вдвое меньше, чем у существующих аналогов;
- результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, были использованы при проведении в АО «ОНИИП» ОКР «Разработка опорного кварцевого генератора».

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработанная динамическая тепловая модель позволяет исследовать динамику тепловых процессов в резонаторе-термостате с распределённым нагревателем;
- выведенное аналитическое выражение связывает частоту генерации с распределением температурного поля на поверхности пьезоэлемента;
- результаты разработки конструкции резонатора-термостата, выполненной с использованием предложенной модели, и экспериментальной проверки данных технических решений подтвердили возможность снижения времени установления частоты в два раза относительно известных аналогов.

Достоверность полученных в работе результатов

Достоверность полученных результатов в ходе проведённых расчётов и исследований, а также научных положений, результатов и выводов диссертации подтверждается результатами проведённых автором экспериментальных исследований с использованием метрологически аттестованных и поверенных средств измерения.

Личный вклад автора

Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Все теоретические и экспериментальные исследования и обработка их результатов выполнены лично автором. Роль автора в постановке задач, выдвижении идей, разработке основных положений и обосновании решений носит определяющий характер.

Апробация работы

Основные научные результаты работы и положения, выносимые на защиту, докладывались и получили положительную оценку на научно-технических конференциях и семинарах различного ранга, в частности:

- Российская науч.-практ. конференция «Разработка и производство отечественной электронной компонентной базы», г. Омск, 28 мая 2014 г.
- IV международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь -2017», г. Омск, 15-16 ноября 2017 г.
- Научно-технический семинар АО «ОНИИП» «Перспективы развития науки и техники радиосвязи», г. Омск, 15 декабря 2017, 4 мая 2018, 22 мая 2018 г.
- XXI международная молодёжная научная конференция «Волновая электроника и её применения в информационных и телекоммуникационных системах», г. Санкт-Петербург, 1-5 октября 2018 г.

- Международный форум «Микроэлектроника–2018». IV международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 1–6 октября 2018 г.
- XXV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 16-18 апреля 2019 г.
- XXII международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», г. Санкт-Петербург, 3-7 июня 2019 г.
- V международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь – 2019», г. Омск, 7-9 октября 2019 г.
- II Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества», г. Омск, 5–7 октября 2022 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них: 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных действующим перечнем ВАК, 8 публикаций в материалах международных научно-технических конференций, 2 публикации в других журналах и сборниках докладов, 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов основного текста, заключения, библиографического списка, включающего 123 наименований, и приложений. Работа изложена на 139 листах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований и задачи, которые необходимо решить для её достижения, указаны научная новизна проведённых исследований и практическая значимость их результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён краткий обзор типов кварцевых генераторов, проведено сравнение характеристик, имеющих на настоящий момент на рынке прецизионных ТСКГ с минимальным временем установления частоты. Рассмотрены проблемы разработки ТСКГ, проанализированы схемно-конструктивные особенности систем термостатирования кварцевых генераторов. Обоснован выбор конструктивно-технологических особенностей РТ, способных обеспечить минимальное время установления частоты прецизионных ТСКГ. В таблице представлено сравнение характеристик прецизионных ТСКГ, имеющих на настоящий момент минимальное время установления частоты при включении.

Таблица 1

Сравнение характеристик прецизионных ТСКГ, имеющих в настоящее время минимальное время установления частоты

Параметр	МЗ2008 АО «ОНИИП»	МХО37/8Р Magic Xtal	SCOCXOL Micro Crystal Switzerland
Выходная частота	10 МГц	10 МГц	10 МГц

Время установления частоты при температуре +20 °С с точностью $1 \cdot 10^{-7}$, не более	15 секунд	15 секунд	15 секунд
Максимальное время установления частоты в диапазоне рабочих температур, не более,	30 секунд (–60 °С)	45 секунд (–40 °С)	н/д
Кратковременная нестабильность частоты за 1 с, не более	$\pm 5 \cdot 10^{-11}$	$\pm 5 \cdot 10^{-12}$	$\pm 5 \cdot 10^{-11}$
Долговременная нестабильность частоты за 1 год, не более	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$
Температурная нестабильность частоты	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$	$\pm 5 \cdot 10^{-9}$	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$
Относительная СПМ фазовых шумов при отстройке от несущей, дБн/Гц:			
10 Гц,	– 118	– 125	– 90
100 Гц	– 145	– 145	– 120
1000 Гц	– 155	– 155	– 130
10 кГц и выше	– 160	– 165	– 135

Данные модели генераторов имеют одинаковое время установления частоты с точностью $1 \cdot 10^{-7}$ – 15 секунд при температуре +20 °С. Однако при низких температурах время готовности увеличивается, и минимальное значение имеет модель генератора М32008 – 30 сек при минимальном значении диапазона рабочих температур –60 °С.

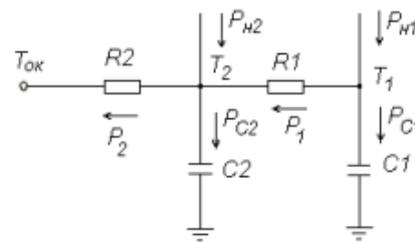
Показано, что дальнейшее уменьшение времени установления частоты, приближающееся к пределу, невозможно без исследования динамики тепловых процессов в резонаторе-термостате в режиме разогрева и оптимизации конструкции резонатора-термостата. Существующие методы расчёта при требуемой точности не дают удовлетворительных результатов.

В работе проведён анализ известных методов расчёта и теплового моделирования резонаторов-термостатов.

В отраслевом стандарте ОСТ 107.060601.001-88 «Термостаты для радиоэлектронных устройств. Методы расчёта» приводится методика расчёта статических и динамических (переходных процессов) тепловых параметров термостата. Статические параметры рассчитываются через тепловые потери идеализированных тел (частей термостата), а динамические (время выхода) – через численное решение нелинейного уравнения переходного процесса, в которое входят мощность нагрева, теплоемкости частей термостата, теплопроводности между основными элементами конструкции и ряд других параметров. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по номограммам, составленным для идеализированных типовых условий эксплуатации, что не даёт требуемой точности и гибкости расчётов.

Метод электротепловой аналогии предлагает замену тепловых процессов на аналогичные им электрические и представление схемы в виде комбинации RC-цепочек. [1, 2] Метод нагляден, но определение эквивалентных значений резисторов и ёмкостей трудоёмко и неточно. В частности, в работах Куталева А. И. [1] тепловая модель РТ, содержащего пьезоэлемент, закрепленный на основании и два нагревателя, включенных последовательно (пленочный на пьезопластине и объемный на основании) имеет вид Рис. 1.

Рис.1. Тепловая модель РТ на основе электро-тепловой аналогии. Теплоёмкости элементов конструкции представлены в виде конденсаторов, тепловая проводимость в виде электрических сопротивлений, как обратная величина



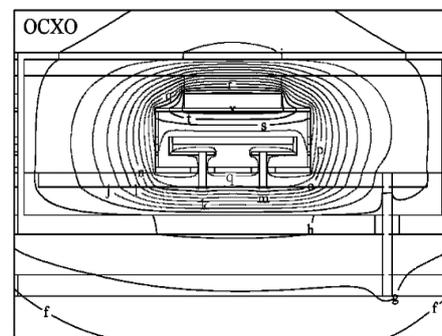
Здесь ПЭ и микроплата представлены в виде математических точек T_2 и T_1 , таким образом, в данной модели не учитывается динамика их температурных полей.

В результате анализа установлено, что существующие методы расчёта тепловых процессов в РТ кварцевых генераторов при начальном разогреве в той или иной мере имеют недостатки:

- в определённой степени являются упрощёнными или приближительными;
 - не учитывают весь комплекс конструктивных и физических факторов, влияющих на динамику тепловых процессов в режиме начального разогрева ПЭ;
 - не учитывают влияние распределения температурного поля в ПЭ на значение частоты генерации;
 - не имеют математического выражения, связывающего распределение температурного поля на электродах ПЭ с частотой генерации;
 - применимы для частных случаев, например, для определённой формы пьезоэлемента
 - и поэтому не могут быть применимы для расчётов тепловых процессов в РТ генераторов с временем установления частоты меньше 30 с.

В работе предлагается и исследуется **метод трёхмерного теплового моделирования** РТ методом конечных элементов. Такой метод позволяет очень точно учитывать конструктивные особенности РТ, и для его выполнения необходимы только точные чертежи изделия и теплофизические параметры используемых материалов. На рис. 2 приведён пример расчёта температурного поля РТ на трёхмерной тепловой модели методом конечных элементов [3].

Рис. 2. Пример расчёта температурного поля РТ методом конечных элементов в виде расположения изотерм в плоскости XZ трёхмерной тепловой модели



Результаты анализа объекта исследования.

Тепловая модель резонатора-термостата с распределённым нагревателем, пленочным и объёмным, приведена на рис. 3.

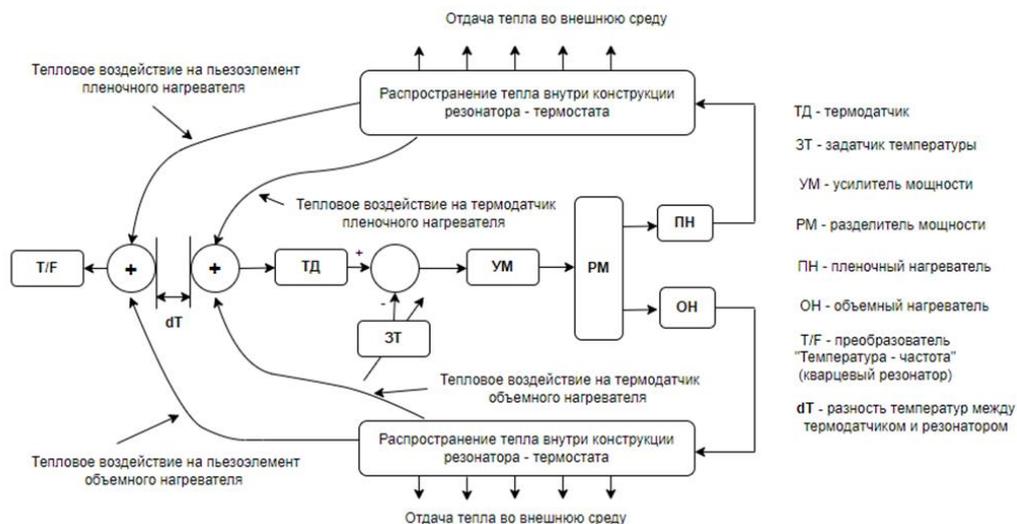


Рис. 3. Тепловая динамическая модель резонатора-термостата

Решение уравнений распространения тепла по составным частям РТ решается численным методом и более точно учитывает все конструктивные особенности изделия. Для определения закономерностей изменения выходной частоты необходимо получить аналитическое значение зависимости выходной частоты от распределения температур на поверхности электродов ПЭ. Модель позволяет высчитывать также динамическую разность температуры между термодатчиком и центральной частью ПЭ, температура которой определяет выходную частоту.

Функциональная схема ТСКГ с РТ с распределённым нагревателем изображена на рис. 4.

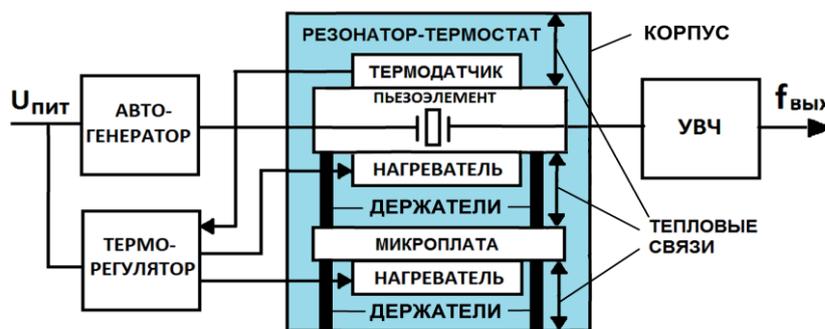
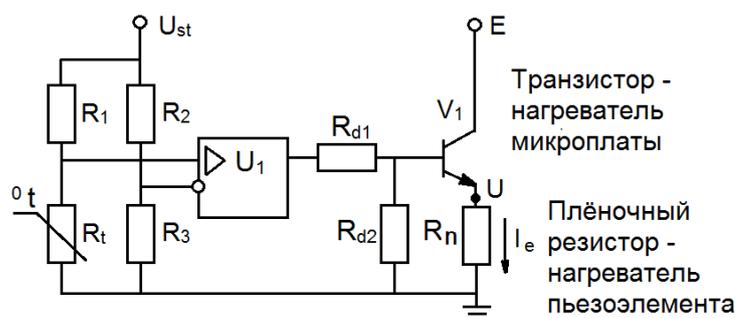


Рис. 4. Функциональная схема термостатированного кварцевого генератора с распределённым нагревателем ПЭ

На основе анализа выбран способ непрерывного терморегулирования ПЭ, наиболее подходящий для обеспечения минимального времени выхода прецизионного ТСКГ на режим РТ с распределённым нагревателем. Данный способ термостатирования использует пропорциональный регулятор для РТ с распределённым нагревателем (рис. 5), состоящий из полупроводникового терморезистора R_t , используемого в качестве термодатчика и включенного в одно из плеч резистивного измерительного моста (R_t, R_1, R_2, R_3), дифференциального усилителя U_1 с коэффициентом усиления K_{ou} , делителя напряжения (резисторы R_{d1}, R_{d2}), транзистора V_1 , используемого в качестве нагревателя МП и напылённого на ПЭ плёночного резистора R_n , служащего в качестве его нагревателя.

Рисунок 5. Схема используемого пропорционального терморегулятора



Между ПЭ, микроплатой и корпусом резонатора существуют тепловые связи, обусловленные теплопроводностью и теплоёмкостью как держателей, так и самих ПЭ и микроплаты, а также лучистым теплообменом между ними и тепловым потоком через остаточные газы в вакуумированном внутреннем объёме резонатора. Конструкция РТ для правильной работы должна быть выполнена в соответствии с условиями, описанными в [4]. Несоответствие конструкции данным требованиям вызывает колебания мощности, выделяемой в нагревателях при начальном разогреве резонатора, приводящей к значительным колебаниям частоты и увеличению времени её установления.

В результате проведённого анализа конструктивных и физических факторов, оказывающие влияние на время установления ТСКГ были определены факторы, которые должны быть математически описаны в разрабатываемой тепловой модели и определены как её входные параметры:

- геометрия элементов конструкции и топология их взаимного расположения;
- температура окружающей среды;
- тепловая мощность, выделяемая в нагревателях;
- управляющая характеристика терморегулятора;
- физические свойства материалов элементов конструкции: удельная плотность и зависимые от температуры удельные теплопроводность и теплоёмкость;
- лучистый теплообмен между элементами конструкции;
- температурно-частотная характеристика ПЭ;
- анизотропия физических свойств материала ПЭ (кварца);
- теплопередача через остаточные газы в вакууме.

В ходе исследований на разработанной модели были установлены факторы, влиянием которых можно пренебречь:

- мощность, выделяемая в зоне электромеханических колебаний ПЭ;
- распределение амплитуд колебаний на электродах ПЭ.

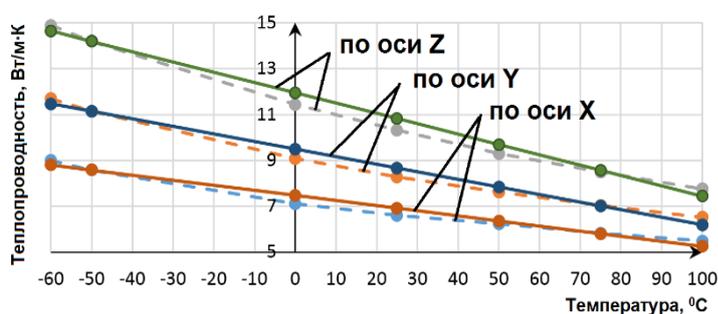
Значение мощности, выделяемой в зоне колебаний ПЭ (0,002 Вт) на несколько порядков меньше мощности, выделяемой нагревателями на ПЭ (1,5 Вт) при его начальном разогреве, поэтому возможно пренебречь её влиянием на время установления частоты генератора. Результаты расчётов, выполненных на основе разработанной модели показал, что учёт распределения амплитуд колебаний в области электродов ПЭ для данной конструкции увеличивает ВУЧ генератора на 0,06 с (~0,03%), что не является значительной величиной и может не учитываться.

Также определён фактор, который невозможно учесть в тепловой модели. Это

температурно-механические напряжения, возникающие в области электродов ПЭ из-за неравномерности температурного поля в элементах конструкции резонатора при начальном разогреве.

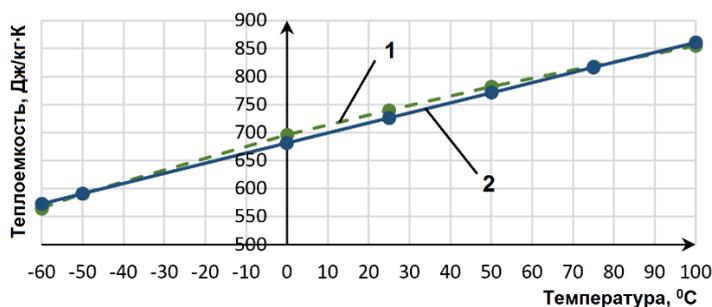
Удельные плотность, теплопроводность и теплоёмкость математически задаются для каждого элемента конструкции как аргумент функции при расчёте дифференциального уравнения теплообмена как линейные функции от температуры. Для анизотропного кварца на основе справочных данных теплопроводности параллельно и перпендикулярно оптической оси кристалла рассчитана теплопроводность в каждом из трёх направлений осей ПЭ ТД-среза, имеющего два поворота относительно кристаллографических осей ($uxb1/\varphi/\Theta$, 23,25°, 34°), построены графики зависимости от температуры и для упрощения расчётов линейно аппроксимированы с максимальной погрешностью в диапазоне рабочих температур, не превышающей 5 %. (рис. 6).

Рис. 6. Линейная аппроксимация (сплошные линии) зависимости теплопроводности кварцевого ПЭ ТД-среза от температуры (пунктирные линии) по осям координат модели X, Y, Z



Также для кварца на основе справочных данных построена зависимость теплоёмкости от температуры и линейно аппроксимирована с погрешностью не более 2,5 % (рис. 7).

Рис. 7. Линейная аппроксимация (линия 2) зависимости теплоёмкости кварцевого ПЭ ТД-среза от температуры (линия 1)



Можно видеть, что значения теплопроводности и теплоёмкости в диапазоне рабочих температур генератора изменяются на величину до двух раз, что должно быть учтено в модели.

Аналогично для остальных применяемых материалов по справочным данным, построены графики зависимости теплопроводности и теплоёмкости от температуры и линейно аппроксимированы с погрешностью менее 2 %.

Во второй главе представлена разработанная трёхмерная температурно-динамическая модель РТ, которая состоит из математического аппарата, описывающего тепловые процессы в резонаторе-термостате и учитывающего влияние конструктивных и физических факторов, и описания геометрии элементов конструкции и топологии их взаимного расположения для расчёта методом конечных элементов. На рисунке 8 представлена конструкция РТ с распределённым

нагревателем ПЭ, трёхмерную структуру которой необходимо описать в модели.

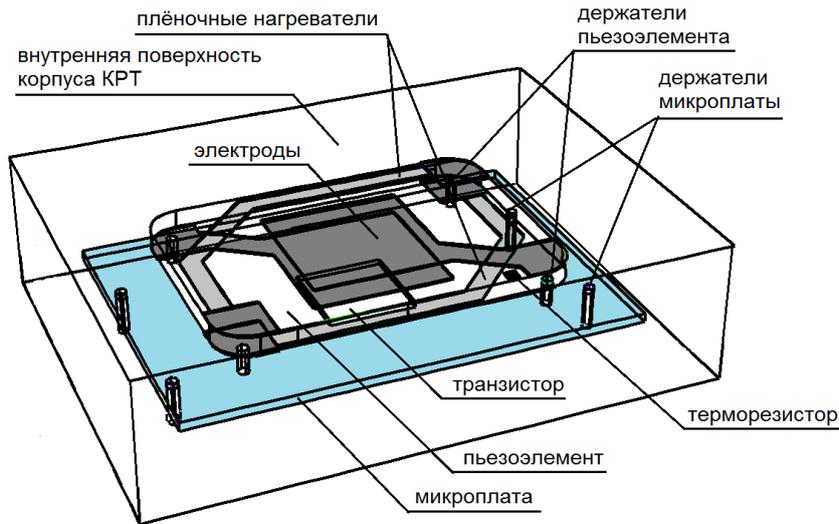


Рис. 8. Конструкция РТ с распределённым подогревом пьезоэлемента

Конструкция состоит из вакуумированного корпуса (показана его внутренняя поверхность), микроплата с транзистором-нагревателем, установленная в корпусе на держателях и ПЭ с плёночным нагревателем, электродами и датчиком температуры, установленного на микроплату при помощи держателей.

Разработанная трёхмерная тепловая математическая модель РТ состоит из системы дифференциальных уравнений. Уравнение распространения тепла в каждой точке трёхмерной модели РТ (дифференциальное уравнение теплообмена) является базовым уравнением для расчёта динамики температурного поля методом конечных элементов

$$\operatorname{div}(q) - Q_{iz} + Q_v = c(T) \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

$$\text{где } c(T) = d + e \cdot T \quad (2)$$

– удельная нестационарная теплоёмкость элемента конструкции РТ, T – температура в рассчитываемой точке, d, e – коэффициенты аппроксимирующей линейной функции нестационарной теплоёмкости, q – плотность теплового потока, описываемая вектором:

$$q = \operatorname{vector} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x}; \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y}; \lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\text{где } \lambda_x(T) = a_x + b_x \cdot T; \lambda_y(T) = a_y + b_y \cdot T; \lambda_z(T) = a_z + b_z \cdot T, \quad (4,5,6)$$

здесь $\lambda_x(T), \lambda_y(T)$ и $\lambda_z(T)$ – удельная нестационарная теплопроводность кварца по осям координат модели x, y и z ; $a_x, b_x, a_y, b_y, a_z, b_z$ – коэффициенты аппроксимирующей линейной функции нестационарной теплопроводности по осям координат; ρ – плотность элемента конструкции РТ.

Q_{iz} – лучистый теплообмен между поверхностью ПЭ и МП и ПЭ или МП и внутренней поверхностью корпуса, Q_v – объёмная плотность мощности, выделяемой на нагревателе ПЭ или микроплаты

$$Q_v = (P_{n1} + P_{n2}) / V_{nagr}, \quad (7)$$

где V_{nagr} – объём нагревателя, P_{n1} – мощность, выделяемая на плёночном резисторе, P_{n2} – мощность на регулирующем транзисторе:

$$P_{n1} = \frac{U^2}{R_n}, \quad P_{n2} = \frac{(U \cdot (E - U))}{R_n}, \quad (8, 9)$$

где E – напряжение питания терморегулятора, R_n – сопротивление нагревателя ПЭ, U – напряжение на эмиттере транзистора – управляющая характеристика терморегулятора

$$U = f(T_{td}), \quad (10)$$

где T_{td} – температура на термодатчике.

Напряжение U для терморегулятора, изображённого на рис. 3 описывается формулами 1, 2.

Лучистый теплообмен между элементами конструкции

$$Q_{iz} = P_{iz1} + P_{iz2} + P_{iz3} \quad (11)$$

Это сумма тепловых потоков:

Тепловой поток, переизлучаемый между основанием и ПЭ [5]

$$P_{iz1} = \frac{1}{1/\varepsilon_2 + \frac{S_2}{S_1}(1/\varepsilon_1 - 1)} \cdot C_0 \cdot S_2 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Тепловой поток, переизлучаемый между ПЭ и корпусом [5]

$$P_{iz3} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{S_1}{S_3}(1/\varepsilon_3 - 1)} \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ок}}{100} \right)^4 \right]. \quad (13)$$

Тепловой поток, переизлучаемый между основанием и корпусом [5]

$$P_{iz2} = \frac{1}{1/\varepsilon_2 + \frac{S_2}{S_3}(1/\varepsilon_3 - 1)} \cdot C_0 \cdot (S_2 \cdot 2 - S_1) \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ок}}{100} \right)^4 \right], \quad (14)$$

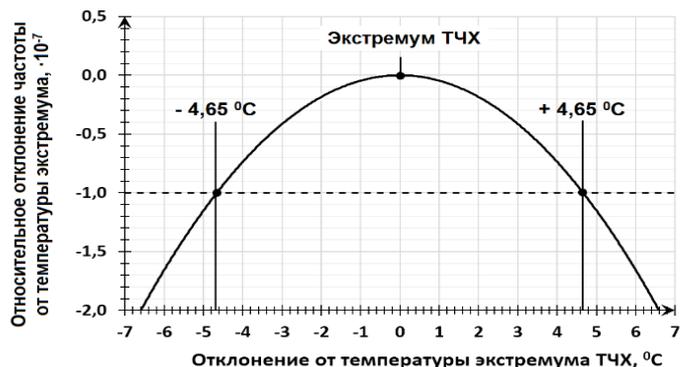
где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – степень черноты ПЭ, микроплаты и корпуса, S_1, S_2, S_3 – площади поверхности ПЭ, микроплаты и корпуса, C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Выражения 1-14 являются математической трёхмерной температурно-динамической тепловой моделью резонатора-термостата, учитывающей конструктивные и физические факторы, влияющие на динамику тепловых процессов в режиме начального разогрева ПЭ.

Выходная частота термостатированного генератора зависит от температуры окружающей среды и в основном определяется температурно-частотной характеристикой ПЭ, то есть зависимостью частоты генерации от температуры на его электродах.

На рис. 9 представлена экспериментально полученная температурно-частотная характеристика ПЭ термостабильного двухповоротного ТД-среза, применяемого в прецизионных термостатированных генераторах.

Рис. 9 Относительное отклонение частоты резонатора ТД-среза



ТЧХ имеет вблизи температуры экстремума форму, близкую к квадратичной параболе, и достаточно точно описывается следующим выражением с погрешностью менее 0,1 %.

$$f(T) = a_2 \cdot (T_{ext} - T)^2, \quad (15)$$

где $f(T)$ – значение частоты от температуры, T – температура в области электродов ПЭ; T_{ext} – температура экстремума ТЧХ резонатора, $a_2 = -4,6 \cdot 10^{-9}$ для ТД-среза согласно произведённым экспериментальным измерениям [6].

Для определения времени установления частоты генерации при расчётах на разработанной модели использован критерий определения установления частоты с определённой точностью.

Интегральное значение температуры на электродах, расположенных в области D вычисляется по формуле

$$T_{int}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy, \quad (16)$$

где D – область электродов, $T_{int}(\bar{x}, \bar{y})$ – среднее значение температуры в области D, S – площадь электродов, (x, y) – координаты точек области D.

Подставляя выражение 16 в 15, получаем выражение 17, устанавливающее зависимость частоты генерации от распределения температурного поля на электродах ПЭ.

$$f(T) = (f_{ext} - a_2 \cdot (T_{ext} - \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy)^2) / f_{ext}, \quad (17)$$

Данное выражение устанавливает зависимость частоты генерации от температурного поля на электродах ПЭ.

Критерием установления частоты с заданной точностью с начала разогрева является значение относительного отклонения частоты генератора с ПЭ ТД-среза от установившегося значения f_{ext} , не превышающее определённого относительного значения точности

$$F_T < (f_{ext} - a_2 \cdot (T_{ext} - \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy)^2) / f_{ext}, \quad (18)$$

то есть выражение 18 позволяет, имея динамику температурного поля при начальном разогреве, рассчитать время установления частоты термостатированного генератора. Типовое относительное значение точности установления частоты, определяемое техническими требованиями для термостатированных генераторов $F_T = 1 \cdot 10^{-7}$.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики температурного поля на трёхмерной модели РТ с распределённым нагревателем ПЭ.

На тепловой модели РТ с ПЭ типовой конструкции, применяемого в прецизионных ТСКГ (рис. 10) проведены исследования по зависимости времени установления частоты от мощности начального разогрева ПЭ.

Расчёты для данной конструкции показали, что увеличение мощности разогрева ПЭ свыше 1,5 Вт не приводят к существенному снижению времени достижения установившейся интегральной температуры на электродах (рис. 11), но увеличивается крутизна управляющей характеристики, что делает работу системы терморегулирования нестабильной. Значение 1,5 Вт использовано для дальнейших расчётов.

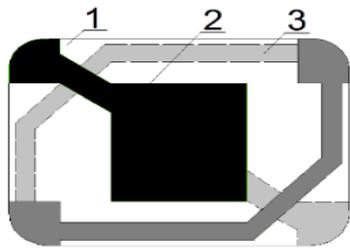


Рис. 10 Конструкция ПЭ ТД-среза для РТ с распределённым нагревателем для прецизионных ТСКГ с выходной частотой 10 МГц: 7x10x0,54 мм, 3-я мехгармоника:
1 – кристаллический элемент, 2 – область электродов, 3 – плёночный нагреватель

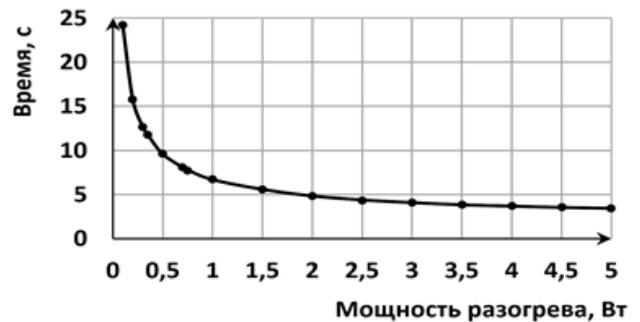


Рис. 11 Зависимость времени достижения установившегося значения интегральной температуры на электродах с точностью 4,6 °С от мощности разогрева ПЭ при $T_{окр} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 12(а) и 12 (б) представлены примеры расчёта температурного поля РТ в режиме начального разогрева, иллюстрирующие распределение температуры в РТ в плоскостях XZ и XY тепловой модели в виде изотерм и позволяющие контролировать динамику тепловых процессов.

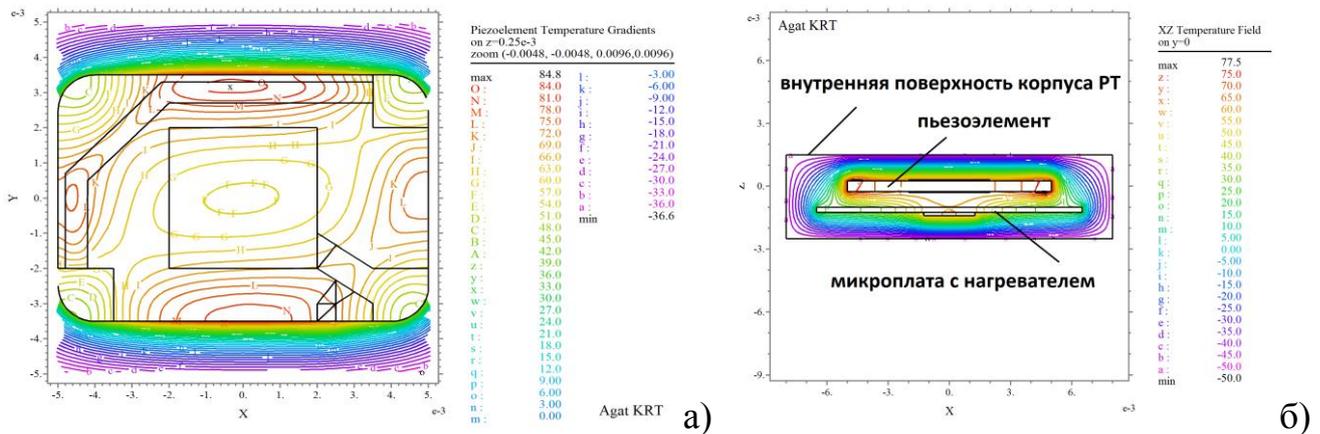


Рис.12. примеры расчёта распределения температуры при температуре окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ горизонтальный разрез РТ по верхней плоскости ПЭ через 3,5 с после включения подогрева (а) и вертикальный продольный разрез РТ по осевой линии через 6 с после включения подогрева (б)

На рис. 13 представлены результаты расчёта мощности, выделяемой на нагревателях резонатора-термостата в режиме разогрева при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), которые иллюстрируют, что значения мощности начального разогрева в РТ с распределённым нагревателем равны для микроплаты и ПЭ, имеющих одинаковую теплоёмкость, а в установившемся режиме подогрев осуществляется в основном нагревателем микроплаты, что соответствует условиям, описанным в патенте РФ № 2236746 [4].

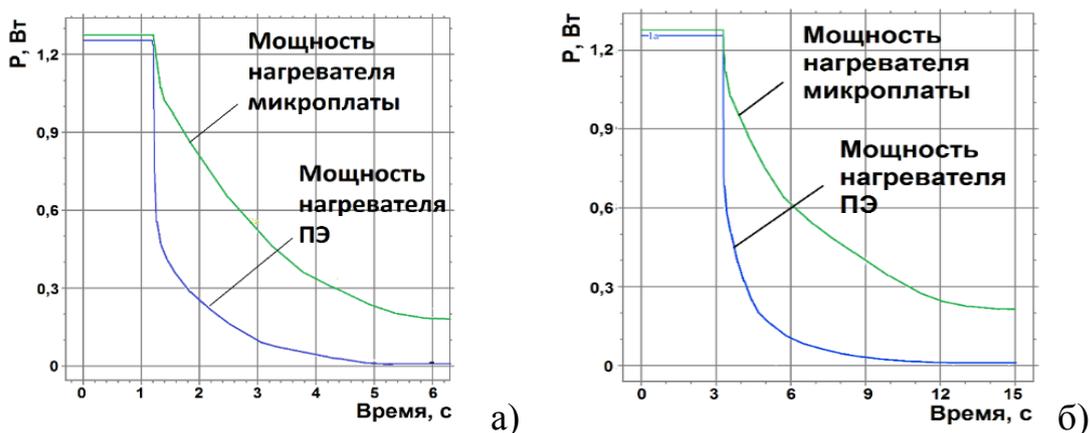


Рис. 13. Мощности, выделяемые на нагревателях РТ при разогреве при температуре окружающей среды +20 °С (а) и при -60 °С (б)

Отсутствуют значительные колебания мощности подогрева, которые приводят к колебаниям частоты, величина которых превышает заданную точность установления частоты, и тем самым, увеличивающие время готовности генератора. Это говорит о том, что разогрев РТ происходит в штатном режиме.

На рис. 14 представлены результаты расчёта отклонения интегральной температуры электродов от установившегося значения в режиме разогрева при температуре окружающей среды +20 °С (а) и -60 °С (б).

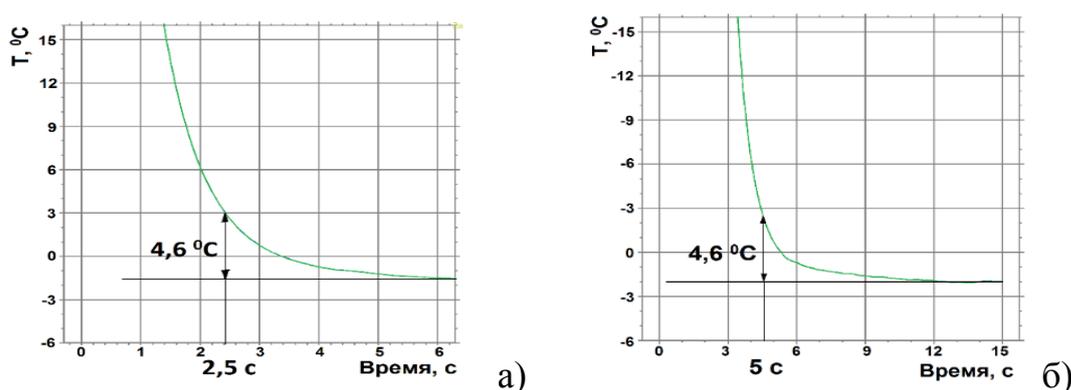


Рис. 14. Отклонение интегральной температуры электродов от установившегося значения в режиме разогрева при температуре окружающей среды +20 °С (а) и при температуре окружающей среды -60 °С (б)

Таким образом определяется время достижения температуры статирования активной зоны электромеханических колебаний ПЭ с заданной точностью и, соответственно, время установления частоты. Это 2,5 с для +20 °С и 5 с для и -60 °С. При минимальном значении диапазона рабочих температур время установления частоты максимально, поэтому определение этого времени для термостатированного генератора необходимо проводить при температуре -60 °С.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований макетных образцов генераторов с резонаторами-термостатами конструкции, разработанной с использованием предложенной модели.

На графиках, представленных на рис. 15 и 16, примеры экспериментальных измерений времени установления частоты макетного образца при температуре +20 °С и -60 °С. Экспериментальные графики получены с применением программно-

аппаратного комплекса TimeView 3.0/Pendulum CNT-91.

Рис. 15. Установление частоты кварцевого генератора после включения при температуре +20 °С. Время установления частоты – 5,5 с

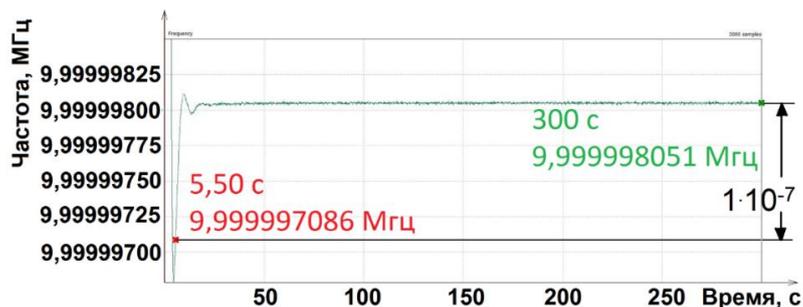
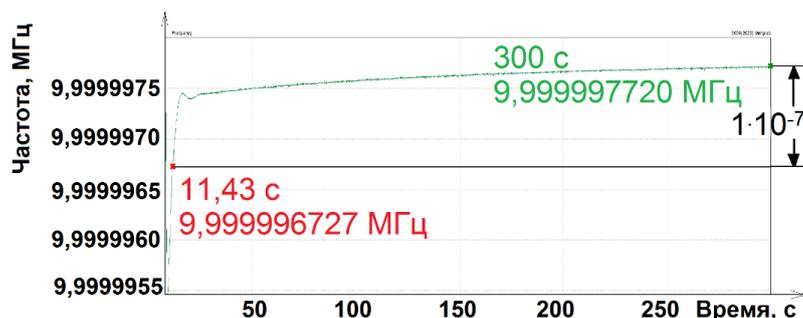


Рис. 16. Установление частоты кварцевого генератора после включения при температуре –60 °С. Время установления частоты –11,4 с



Измерения, проведённые на нескольких десятках образцов генераторов разработанной конструкции, показали, что время установления частоты при температуре +20 °С составило от 3,5 до 6 секунд, при расчётном значении 2,5 с, при температуре -60 °С – от 11 до 13 секунд, при расчётном значении 5 с. Такие результаты объясняются:

- технологическим разбросом электрорадиоизделий (ЭРИ) генератора и элементов конструкции резонатора-термостата (10...20 %);
- влиянием температурно-механических напряжений в области электродов при начальном разогреве ТСКГ.

В таблице 2 представлены результаты измерений электрических параметров партии образцов генераторов с резонаторами-термостатами разработанной конструкции и приведены в сравнении с генератором исходной конструкции, имеющего наименьшее время установления частоты среди аналогов.

Таблица 2

Результаты измерений электрических параметров партии образцов генераторов с РТ исходной и разработанной конструкции

Параметр	Исходный ТСКГ	Разработанный ТСКГ
Время установления частоты при температуре +20 °С, не более	15 секунд	<u>6 секунд</u>
Время установления частоты при температуре –60 °С, не более	30 секунд	<u>13 секунд</u>
Кратковременная нестабильность частоты за 1 с, не более	$\pm 5 \cdot 10^{-11}$	$\pm 5 \cdot 10^{-11}$
Долговременная нестабильность частоты за 1 год, не более	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$
Температурная нестабильность частоты	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$

Относительная СПМ фазовых шумов при отстройке от несущей: 10 Гц	– 118 дБн/Гц	– 118 дБн/Гц
100 Гц	– 145 дБн/Гц	– 145 дБн/Гц
1000 Гц	– 155 дБн/Гц	– 155 дБн/Гц
10 кГц и выше	– 160 дБн/Гц	– 160 дБн/Гц

Можно видеть, что время установления частоты сокращено в 2 раза, при этом остальные основные технические характеристики не ухудшились.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе работы получены следующие результаты:

1. определены конструктивные и физические факторы, влияющие на тепловые процессы в РТ;
2. разработана пространственная температурно-динамическая модель РТ с распределённым подогревом ПЭ, учитывающая конструктивные и физические факторы, влияющие на тепловые процессы в РТ, и позволяющая определить время установления частоты термостатированных генераторов для любой конструкции РТ;
3. исследования на разработанной модели РТ показали возможность значительного снижения времени установления частоты для прецизионных ТСКГ;
4. в результате исследования на предложенной модели разработана конструкция РТ для прецизионных ТСКГ с уменьшенным временем установления частоты, изготовлены экспериментальные образцы генераторов с резонаторами разработанной конструкции, в натурном эксперименте показавшие снижение времени установления частоты генераторов в 2 раза без ухудшения других характеристик.

На основании анализа результатов работы сделан следующий вывод:

Экспериментальная проверка результатов исследования динамики тепловых процессов в РТ с распределённым нагревателем ПЭ с использованием предложенной модели подтвердила её адекватность и возможность снижения времени установления частоты прецизионных ТСКГ с выходной частотой 10 МГц в диапазоне рабочих температур от -60°C до $+70^{\circ}\text{C}$ с 30 до 13 с, то есть более чем в 2 раза относительно известных аналогов, что в ряде случаев позволяет снизить время выхода на режим радиоэлектронных систем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Карагусов, В. И. Долговременная нестабильность кварцевых генераторов с резонатором-термостатом в металлостеклянном корпусе, изготавливаемом с применением лазерной сварки / В. И. Карагусов // Техника радиосвязи. – 2016. – Вып. 4 (31). – С. 84–91.
2. Карагусов, В. И. Уточнение модели электротепловой аналогии для расчета кварцевых резонаторов-термостатов с распределенным нагревателем / В. И. Карагусов // Техника радиосвязи. – 2017. – Вып. 2 (33). – С. 96–104.
3. Карагусов, В. И. Результаты исследования динамики тепловых процессов в кварцевом пьезоэлементе с прямым термостатированием в режиме разогрева на численно-аналитической модели / В. И. Карагусов // Техника радиосвязи. – 2017. – Вып. 3 (34). – С. 95–110.

4. Применение ЛТСС-керамики в конструкции кварцевого резонатора-термостата / В. И. Карагузов, С. В. Ермоленко, А. М. Ярош, А. С. Паленова // Техника радиосвязи. – 2018. – Вып. 1 (36). – С. 121–126.

5. Карагузов, В. И. Исследование динамики тепловых процессов в кварцевом резонаторе-термостате с распределённым нагревателем в режиме разогрева / В. И. Карагузов // Техника радиосвязи. – 2018. – Вып. 2 (37). – С. 83–95.

6. Karagusov, V. I. Reducing the Precision Oven-Controlled Quartz Crystal Oscillators Warm-Up Time / V. I. Karagusov. – DOI: 10.1109/WECNF.2018.8604465 // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF) (St. Petersburg, 26–30 November 2018). – IEEE, 2018. – P. 1–5. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8604465&isnumber=8604300> (IEEE Conference Publication Program. SCOPUS) (дата обращения: 24.12.2018).

7. Карагузов, В. И. Определение оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза / В. И. Карагузов // Наноиндустрия. – 2019. – № 5 (89). – С. 373–381.

8. Ложников, А. О. Термостатированный кварцевый генератор с диапазоном частот 80-130 МГц / А. О. Ложников, В. И. Карагузов, А. В. Розанова // Техника радиосвязи. – 2019. – Вып. 4 (43). – С. 86–93.

9. Карагузов, В. И. Оценка влияния теплового экрана в кварцевом резонаторе-термостате на нестабильность генерируемой частоты / В. И. Карагузов, А. В. Розанова. – DOI: 10.33286/2075-8693-2020-47-111-119 // Техника радиосвязи. – 2020. – Вып. 4 (47). – С. 111–119.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

1. Куталев, А. И. Высокостабильный кварцевый генератор для бортовой аппаратуры / А. И. Куталев, В. И. Карагузов // Радиотехника, электроника и связь : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 5–8 июля 2011 г.). – Омск : Радиотехника, 2011. – С. 535–540.

2. Карагузов, В. И. Термостатированный кварцевый генератор с ультрамалым временем установления частоты / В. И. Карагузов // Техника радиосвязи. – 2015. – Вып. 2 (25). – С. 109–117.

3. Карагузов, В. И. Кварцевая стабилизация частоты, как стратегическая отрасль науки и техники в XX-XXI веках / В. И. Карагузов // Россия и мировые тенденции развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Омск, 15–16 мая 2015 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ. – 2015. – С. 36–42.

4. Карагузов, В. И. Минимизация времени разогрева активной зоны колебаний пьезоэлемента с прямым термостатированием / В. И. Карагузов // Радиотехника, электроника и связь : сб. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 15–16 нояб. 2017 г.) / Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения. – Омск : АО ОНИИП, 2017. – С. 426–435.

5. Карагузов, В. И. Уменьшение времени установления частоты прецизионных термостатированных генераторов / В. И. Карагузов // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах : материалы XXI Междунар. молодеж. конф. (Санкт-Петербург, 1–5 окт. 2018 г.) / С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2018. – С. 84–91.

6. Карагузов, В. И. Определение оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза / В. И. Карагузов // Международный форум «Микроэлектро-

- ника-2018». 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» : сб. тез. (Крым, Алушта, 1–6 окт. 2018 г.). – Москва : Техносфера, 2018. – С. 328–333 (РИНЦ).
7. Карагусов, В. И. Оптимизация конструкции резонатора-термостата для уменьшения времени установления частоты прецизионного кварцевого генератора / В. И. Карагусов // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. (Воронеж, 16–18 апр. 2019 г.) / Воронеж. гос. ун-т, АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2019. – Т. 5. – С. 380–386.
8. Астапенко, Д. В. Быстродействующий ключ для пьезоэлектрических СВЧ генераторов / Д. В. Астапенко, А. О. Ложников, В. И. Карагусов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : сб. ст. XXII Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 3–7 июня 2019 г.) / С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения – Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2019. – Ч. 1. – С. 73–76. (РИНЦ).
9. Карагусов, В. И. Термостатированный кварцевый генератор 80-130 МГц для космического применения / А. О. Ложников, В. И. Карагусов, А. В. Розанова // Радиотехника, электроника и связь-2019 : сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 7–9 окт. 2019 г.) / Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения. – Омск : Изд-во ОНИИП, 2019. – С. 360–366.
10. Косых, А. В. Динамическая температурная модель термостатированного кварцевого генератора с композиционным нагревом / А. В. Косых. В. И. Карагусов // Радиоп физика, фотоника и исследование свойств вещества : тез. докл. II Рос. науч. конф. (Омск, 5–7 окт. 2022 г.) / Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения. – Омск : Изд-во ОНИИП, 2022. – С. 131–134. – 1 CD-ROM.

Патенты

1. Патент на полезную модель № 175889 Российская Федерация, МПК H03H 3/00. Миниатюрный кварцевый резонатор-термостат : № 2017122097 : заявл. 22.06.2017 : опубл. 21.12.2017 / В. И. Карагусов, А. С. Паленова, С. В. Ермоленко, А. М. Ярош ; заявитель АО «Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения». – 8 с.

Используемая литература:

1. Куталев, А. И. Кварцевый резонатор-термостат с распределённым нагревателем / А. И. Куталев // Техника радиосвязи. – 2007. – Вып. 12. – С. 78–87.
2. Хан, К. И. Электротепловая аналогия термостата для игольчатых нагревателей / К. И. Хан // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XIV Междунар. конф. аспирантов и молодых ученых (Томск, 25–28 апр. 2017 г.) : в 7 т. Т. 7. IT-технологии и электроника / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 120–122.
3. Хоменко, И. В. Результаты исследования термостатированного кварцевого генератора с двухмодовым возбуждением резонатора ТД-среза на численно-аналитической модели / И. В. Хоменко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2008. – № 3 (70). – С. 115–121.
4. Патент № 2236746 Российская Федерация, МПК H03H9/08. Кварцевый резонатор-термостат : № 2003100159 : заявл. 04.01.2003 : опубл. 20.09.2004 / А. И. Куталев ; заявитель Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения.
5. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 3-е изд., репр. – Москва : Изд. дом «БАСТЕТ». 2010. – 344 с. – ISBN 978-5-903178-20-9.
6. Ложников, А. О. Исследование спектра колебаний кварцевых резонаторов двухповоротных срезов с улучшенной моночастотностью / А. О. Ложников, С. В. Ермоленко // Техника радиосвязи. – 2016. – Вып. 2 (29). – С. 101–108.