

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»
Акционерное общество
«Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

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

Диссертация
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
А. В. Косых

Омск 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОСТАТИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	13
1.1 Краткая характеристика рассматриваемой проблемы	13
1.1.1. Особенности способов термостатирования кварцевых генераторов	16
1.2 Анализ современных моделей прецизионных ТСКГ, имеющих минимальное время выхода на режим	26
1.3 Анализ известных методов расчёта и теплового моделирования резонаторов-термостатов.	28
1.4 Результаты анализа объекта и предмета исследования	31
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТРЁХМЕРНОЙ ТЕМПЕРАТУРНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА-ТЕРМОСТАТА	35
2.1 Математическая и топологическая составляющие трёхмерной температурно-динамической модели резонатора-термостата	35
2.2. Моделирование системы терморегулирования	40
2.3. Математическая тепловая модель РТ	43
2.4. Температурно-частотная характеристика РТ	46
2.5. Исследование значимости учёта фактора теплового переизлучения между элементами конструкции РТ	49
2.6. Результаты исследования значимости учёта фактора теплового переизлучения между элементами конструкции РТ	54
2.7. Исследование значимости распределения амплитуд колебаний в области электродов ПЭ	57
2.8. Исследование значимости мощности, выделяемой в зоне колебаний ПЭ	58
2.9. Определение оптимальной мощности начального разогрева ПЭ	59

2.9.1. Определение факторов, влияющих на время достижения температуры статирования в активной зоне колебаний ПЭ с прямым подогревом для прецизионных ТСКГ	60
2.9.2. Построение тепловых моделей пьезоэлементов	62
2.9.3. Исследование конструкции №1 с П-образным нагревателем	65
2.9.4. Исследование конструкции №2 с замкнутым контуром нагревателя	68
2.9.5. Исследование конструкции №3 с замкнутым контуром нагревателя	71
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РТ С РАПРЕДЕЛЁННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ ПЭ	79
3.1. Результаты расчётов температуры в различных точках РТ в режиме разогрева	79
3.2. Результаты расчётов мощностей, выделяемых на нагревателях РТ в режиме разогрева	82
3.3. Результаты расчётов времени установления частоты	84
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТСКГ С РТ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ	88
4.1. Изготовление резонатора термостата, разработанной конструкции	88
4.2.. Исследование параметров образцов генераторов с РТ разработанной конструкции	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	105
ПРИЛОЖЕНИЯ	120

Приложение А. Текст дескрипторного файла описания расчёта времени установления частоты в ПЭ с прямым термостатированием в программе FlexPDE	120
Приложение Б. Текст дескрипторного файла описания расчёта времени установления частоты в РТ с распределённым термостатированием в программе FlexPDE	127
Приложение В. Акт внедрения результатов диссертационной работы	141

ВВЕДЕНИЕ

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 (ТСКГ), обеспечивающие наилучшую долговременную и температурную стабильность среди генераторов частоты на основе пьезоэлектриков.

Основными параметрами источников опорных колебаний являются стабильность частоты (кратковременная, долговременная, температурная), а также габариты, потребляемая мощность и время установления частоты после включения. Для ТСКГ критическими параметрами являются потребляемая мощность и время установления частоты. Эти параметры являются противоречивыми, и их одновременное выполнение требует тщательной проработки конструкции и оптимизации параметров термостата.

Готовность к работе при включении прецизионных ТСКГ ограничивается временем, необходимым для разогрева пьезоэлемента от температуры окружающей среды до температуры статирования, которая должна быть выше максимального значения диапазона рабочих температур. 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 с внутренним распределённым нагревателем пьезоэлемента позволило снизить время установления частоты термостатированных генераторов 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, В.Г. Абрамзона, А.И. Куталёва, В.Я. Баржина, П.Е. Кандыбы, П.Г. Позднякова, А.В. Косых, И.В. Хоменко, Ф.Г. Тинты (F. G. Tinta, A.C. Матистика (A.S. Matistic), Г.А. Лагасса (G. A. Lagasse), Б. Хиллериха, (B. Hillerich), О. Наглера (O. Nagler), К. Вайса (K. Weiss) и др.

В настоящее время в научной литературе этот вопрос недостаточно освещён с точки зрения динамики температурного поля пьезоэлемента (ПЭ) в режиме начального разогрева от температуры окружающей среды до температуры статирования. Приблизительные расчёты параметров конструкции требуют множество итераций промежуточного макетирования. Существующие методы расчёта тепловых процессов в резонаторах-термостатах (РТ) кварцевых генераторов при начальном разогреве в той или иной мере в значительной мере являются упрощёнными или приближительными и не могут быть применимы для расчётов тепловых процессов в РТ генераторов с временем установления частоты меньше 30 с.

Решить вопросы снижения ВУЧ могут помочь разработка пространственной тепловой модели, максимально точно описывающей процессы, происходящие в реальном кварцевом РТ, и расчёты на ней численным методом.

Объектом исследования диссертационной работы являются термостатированные кварцевые генераторы с резонаторами-термостатами 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.

Основная идея работы состоит в уменьшении времени установления частоты прецизионных термостатированных кварцевых генераторов (ТСКГ) за счёт оптимизации пространственного и временного распределения поля

температур в термостате с двумя нагревателями в процессе его выхода на стационарный режим.

Цели и задачи исследования

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

Поставленная цель достигалась решением следующих задач:

1. Анализ конструктивных и физических факторов, влияющих на тепловые процессы в резонаторе-термостате;
2. Разработка аналитической пространственной температурно-динамической модели резонатора с распределённым подогревом пьезоэлемента, включающей электрическую схему терморегуляции, учитывающей комплекс влияющих конструктивных и физических факторов и позволяющей определить время установления частоты генератора для любой конструкции резонатора-термостата;
3. Разработка конструкции резонатора-термостата для прецизионных термостатированных генераторов с уменьшенным временем установления частоты резонатора при сохранении заданных точностных характеристик. при помощи исследования динамики температурного поля резонатора в режиме разогрева и расчётов частотно-временной характеристики генератора на разработанной модели;
4. Проведение экспериментальных исследований прецизионных термостатированных генераторов с резонатором-термостатом разработанной конструкции.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач использовались:

1. Методы теории теплопроводности.
2. Методы численного моделирования.

3. Метод конечных элементов для решения дифференциальных уравнений в частных производных.
4. Экспериментальные методы исследований.
5. Методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна.

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

1. 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.
2. Получены аналитические зависимости частоты генерации РТ от распределения температурного поля РТ.
3. Предложена методика моделирования процессов распределения и установления процессов распределения температурного поля в пределах РТ, а также выходной частоты.

Ценность работы

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 с необходимой точностью для любой конструкции РТ.

Практическая значимость работы:

1. 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.

2. 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.
3. Экспериментально показана достижимость времени установления частоты прецизионных термостатированных кварцевых генераторов в широком диапазоне рабочих температур вдвое меньше, чем у существующих аналогов.
4. Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, были использованы при проведении в АО «ОНИИП» ОКР «Разработка опорного кварцевого генератора» и имеют возможность внедрения в других разработках в рамках отрасли.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная динамическая тепловая модель позволяет исследовать динамику тепловых процессов в резонаторе-термостате с распределённым нагревателем.
2. Выведенное аналитическое выражение связывает частоту генерации с распределением температурного поля на поверхности пьезоэлемента.
3. 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.

Реализация результатов работы

- Результаты исследований внедрены на АО «Омский НИИ приборостроения» в ходе выполнения ОКР «Разработка опорного генератора». Температурно-динамическая модель тепловых процессов в кварцевом РТ с распределённым нагревателем на основе электротепловой аналогии, позволяющая учитывать лучистый теплообмен, пространственные температурно-динамические модели РТ с прямым и распределённым подогревом, учитывающие факторы, влияющие на градиенты температуры в активной зоне ПЭ в режиме разогрева, позволили рассчитать и сконструировать РТ для прецизионного ТСКГ. При сохранении высоких показателей по стабильности частоты, низких шумовых характеристик время установления частоты ТСКГ с точностью не хуже $1 \cdot 10^{-7}$ составляет 5-7 с при $+20$ °С и не превышает 15 с в диапазоне рабочих температур от -50 °С до $+70$ °С.
- На конструкцию кварцевого РТ подучен патент на полезную модель.

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:

1. Российская науч.-практ. конференция «Разработка и производство отечественной электронной компонентной базы», г. Омск, 28 мая 2014 г.
2. IV международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь -2017», г. Омск, 15-16 ноября 2017 г.
3. Научно-технический семинар АО «ОНИИП» «Перспективы развития науки и техники радиосвязи», г. Омск, 15 декабря 2017, 4 мая 2018, 22 мая 2018 г.
4. XXI международная молодёжная научная конференция «Волновая электроника и её применения в информационных и телекоммуникационных системах», г. Санкт-Петербург, 1-5 октября 2018 г.
5. Международный форум «Микроэлектроника–2018». IV международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 1–6 октября 2018 г.
6. XXV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 16-18 апреля 2019 г.
7. XXII международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», г. Санкт-Петербург, 3-7 июня 2019 г.
8. V международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь – 2019», г. Омск, 7-9 октября 2019 г.
9. II Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества», г. Омск, 5–7 октября 2022 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них: 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных действующим перечнем ВАК, 7 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 машинописного текста, заключения, библиографического списка, включающего 123 наименований и приложений. Работа изложена на 141 листах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 9 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Косых А.В. и к.т.н., доценту Хоменко И.В. (кафедра «РТУ и СД», ОмГТУ) за неоценимую помощь в работе над диссертацией.

Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОСТАТИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

1.1. Краткая характеристика рассматриваемой проблемы

Появление кварцевой стабилизации частоты опорных генераторов и применение кварцевых генераторов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) дало мощный импульс развития средств связи, позволило создать устройства бесподстроечной связи и значительно увеличить количество каналов в частотных диапазонах. Однако несмотря на то, что температурная нестабильность кварцевых генераторов значительно лучше, чем у генераторов на основе колебательных LC-контуров, было определено, что температурно-частотная характеристика (ТЧХ) кварцевых генераторов в основном определяется ТЧХ его кварцевого резонатора (КР), которая имеет S-образную форму с двумя экстремумами: точкой минимума и точкой максимума. На рис. 1.1 показан пример ТЧХ кварцевого резонатора АТ-среза $yx1/+35^\circ+\Delta\theta$, применяемого в ТККГ [1, с. 27].

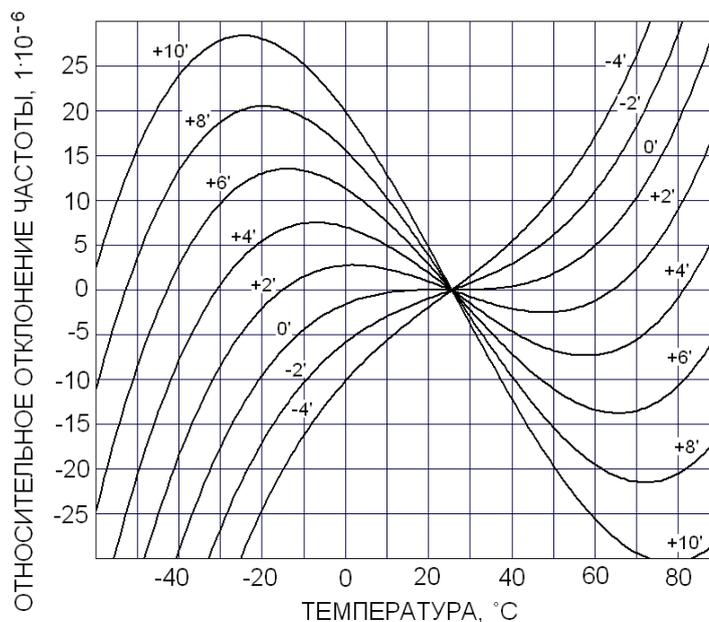


Рис. 1.1. Пример ТЧХ кварцевого резонатора АТ-среза $yx1/+35^\circ+\Delta\theta$

Достижение быстрой готовности радиоэлектронных систем после включения является важной технической характеристикой. В случаях, когда система должна производить частотные или временные измерения сразу после её включения, параметром, зачастую определяющим готовность системы, является время установления частоты (ВУЧ) её опорного генератора с момента его включения, и минимизация ВУЧ является актуальной задачей при конструировании кварцевых генераторов (КГ).

Существуют два подхода к решению этой проблемы. Это электрическая термокомпенсация ухода частоты и термостатирование резонатора или генератора в целом. Оба подхода имеют преимущества и недостатки. Так термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ) имеют малое энергопотребление, малые габариты и массу, и быстрый выход на режим. время готовности к работе или время установления частоты (ВУЧ) таких генераторов не превышает 1 с до величины режимной нестабильности (обычно $1...3 \cdot 10^{-6}$ относительно номинального значения). Стоит отметить, что время установления частоты ТККГ с точностью $\pm 1...10 \cdot 10^{-7}$ (типичное значение для ТСКГ) значительно выше и может достигать десятков секунд, что обусловлено прогревом элементов конструкции генератора, что также является недостатком ТККГ.

ТККГ конструируются таким образом, чтобы температура ПЭ находилась на участке ТЧХ с минимальной кривизной, что позволило бы при применении электрической схемы компенсации температурного ухода частоты автогенератора получить наименьшее отклонение выходной частоты генератора от номинального значения во всём диапазоне рабочих температур.

Результаты исследований температурной стабильности и времени установления частоты ТККГ описаны в большом количестве работ, например в [2].

На рис. 1.2 приведён пример расчёта термокомпенсирующей функции для ТККГ из [1, с. 149].

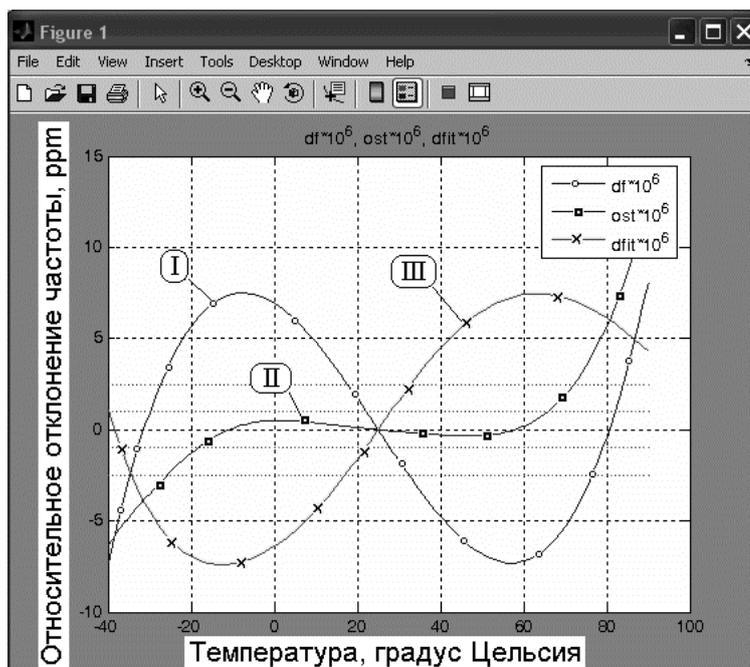


Рис. 1.2. (I) – ТЧХ кварцевого резонатора;
 (II) – ТЧХ после термокомпенсации;
 (III) – функция термокомпенсации

Графики исходной (I), термокомпенсированной (II) ТЧХ и функции, выражающей зависимость изменения частоты от температуры под действием термозависимого потенциометра и варикапов в управляющей ёмкости (III) (функция компенсации). Как видно из графика, нестабильность термокомпенсированной ТЧХ в интервале температур от -18 до $+66$ °C составляет ± 1 ppm, что более чем в 7 раз лучше, чем до компенсации в этом же интервале температур (см. график I на рис. П.3.4). [1, с. 149].

Температурная нестабильность ТККГ достаточно высока и, как правило, лежит в пределах $\pm 1 \dots 10 \cdot 10^{-6}$. Несмотря на достигнутые в последнее время успехи, этот показатель не достигает возможностей ТСКГ, что ограничивает область их применения. При этом ТККГ обладают сравнительно невысокими показателями и по долговременной стабильности, что не всегда является приемлемым.

Второй подход к решению проблемы – термостатирование ПЭ.

1.1.1. Особенности способов внутреннего термостатирования кварцевых генераторов

Исторически в первых конструкциях ТСКГ, появившихся в середине XX века, применялось внешнее термостатирование. Проблемами в этой области занималось большое количество исследователей [3-23].

Первые конструкции ТСКГ, разработанные в 1960-х годах имели размеры в несколько десятков сантиметров и вес в несколько килограммов, время выхода на режим составляло десятки и сотни минут [24]. Такой способ термостатирования называется внешним. То есть, в прецизионных ТСКГ изначально весь генератор или его резонатор традиционно помещались в термостат, подогрев которого производился внешними нагревателями, как в ТСКГ «Нарцисс» и «Гиацинт М», и требовалось значительное время на разогрев всей конструкции.

В дальнейшем уменьшение массогабаритных показателей, снижения потребляемой мощности и времени установления частоты ТСКГ с внешним термостатированием шло по пути миниатюризации конструкции резонатора и внешнего термостата.

Так как частота генератора в основном зависит от температуры в активной зоне ПЭ, требуется время для равномерного разогрева ПЭ от температуры окружающей среды до температуры статирования, поэтому для уменьшения времени готовности ТСКГ применяется внутреннее термостатирование резонатора. [25].

С применением внутреннего термостатирования был сделан значительный шаг в улучшении показателей. Борьба за снижение массогабаритных показателей, потребляемой мощности и времени готовности ТСКГ привела к идее термостатирования только кварцевого пьезоэлемента, находящегося в вакуумированной зоне, то есть к появлению РТ с внутренним подогревом. Так ТСКГ «Гладиолус», разработанный в 1987 г. имеет время готовности не более 3 минут. Миниатюрный стеклянный резонатор имел датчик температуры и нагреватель, расположенные внутри вакуумированной стеклянной колбы

резонатора, и такие резонаторы получили название «кварцевые резонаторы-термостаты» (КРТ) или просто «резонаторы-термостаты» (РТ). На рис.1.3 приведены чертежи миниатюрных стеклянных корпусов серии Д.

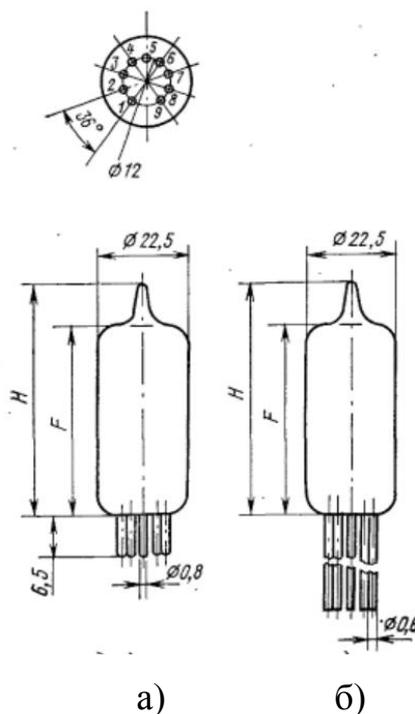


Рис. 1.3. Стеклянные корпуса вакуумных резонаторов серии Д:
а – со штырьками; б – с гибкими выводами

В случаях высоких требований к температурной и долговременной стабильности частоты обосновано применение прецизионных ТСКГ, в которых обычно используются пьезоэлемент (ПЭ) двухповоротного ТД-среза ($yxbl/\varphi/\Theta$, $22^\circ \leq \varphi \leq 24^\circ$, $33,5^\circ \leq \Theta \leq 35^\circ$) или его аналоги (SC-cut, IT-cut).

При этом способе экстремум ТЧХ ПЭ выбирается так, чтобы он находился несколько выше максимального значения диапазона рабочих температур, Резонатор при этом в рабочем режиме подогревается до температуры экстремума ТЧХ при помощи системы терморегулирования, то есть используется термостат. На рис. 1.4 приведено семейство кривых ТЧХ кварцевых ПЭ SC-среза, как функция переменной угла Θ , являющегося аналогом ТД-среза [26].

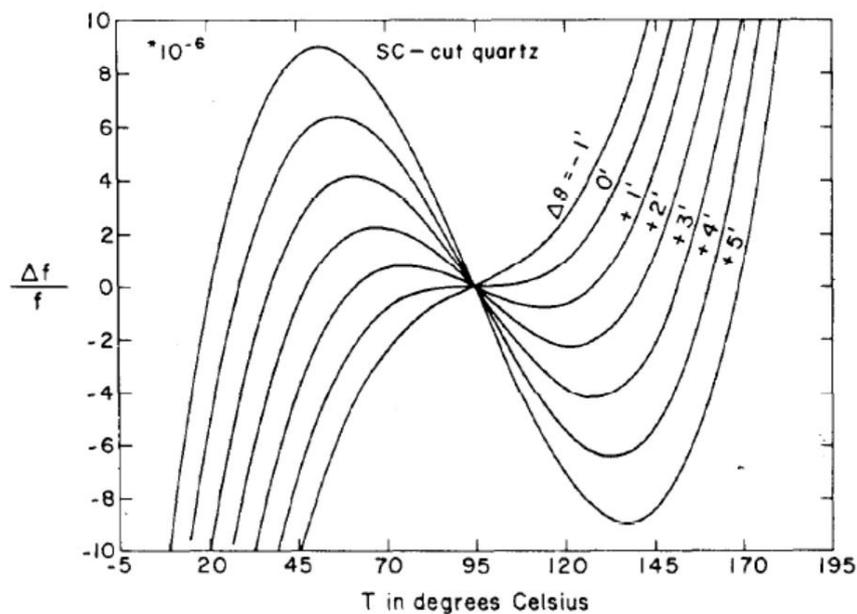


Рис. 1.4. Семейство температурно-частотных характеристик кварцевых ПЭ SC-среза, как функция переменной угла θ .

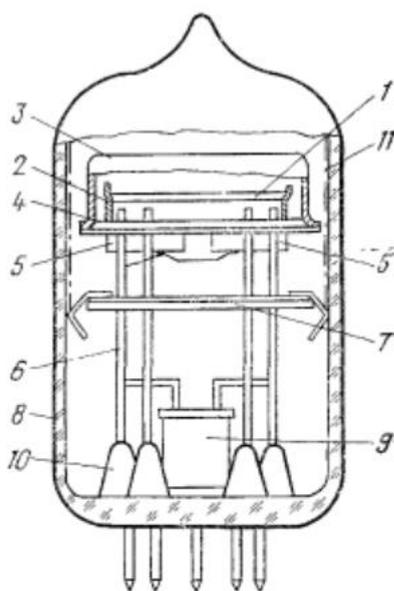
Исследования в области увеличения температурной и долговременной стабильности частоты ТСКГ с внутренним подогревом резонаторов (то есть генераторов, имеющих РТ), а также снижения времени установления частоты проводились на протяжении десятков лет и остаются актуальными и на настоящий момент [27-73].

Типовая температурная нестабильность ТСКГ в настоящий момент составляет $\pm 1 \dots 5 \cdot 10^{-8}$ и даже достигает величин $\pm 1 \dots 5 \cdot 10^{-10}$ [74]. Однако за повышение температурной стабильности приходится платить увеличением массогабаритных показателей и сравнительно высоким энергопотреблением. Также существенным недостатком по сравнению с ТККГ у термостатированных генераторов является время установления частоты, поскольку после включения требуется время для разогрева резонатора от температуры окружающей среды до температуры статирования, и эта величина при минимальном значении диапазона рабочих температур может достигать 150°C .

С развитием электроники и миниатюризации РЭА перед разработчиками ТСКГ перманентно стояла задача по улучшению этих параметров. В

конструкциях генераторов известно несколько способов внутреннего термостатирования.

На практике в настоящее время в реальных конструкциях чаще всего применяется способ косвенного подогрева ПЭ. Результаты исследований в данной области опубликованы в множестве работ, Часть из них перечислена выше. На рис. 1.5 приведена базовая конструкция РТ с косвенным подогревом ПЭ [75, с. 332].



1

Рис. 1.5. Базовая конструкция РТ: 1 – ПЭ; 2 – стойки кристаллодержателя; 3 – колпачок (тепловой экран); 4 – основание камеры; 5 – нагреватель и датчик температуры; 6 – стойки держателя; 7 – фиксирующее основание с распорными пружинами; 8 – стеклянный баллон; 9 – газопоглотитель; 10 – основание корпуса с выводами; 11 – теплоотражающее покрытие

Данный способ при всех своих преимуществах перед внешним термостатированием имеет свои особенности. Там же в [75, с. 333] отмечается, что для данного способа термостатирования ПЭ перепад температур по основанию термостатируемого узла приводит к появлению теплового потока через ПЭ и соответствующих ему градиентов температуры в ПЭ, которые являются дестабилизирующим фактором, ухудшающим температурную стабильность частоты. РТ. Изменения частоты РТ от температуры среды часто качественно отличаются от ТЧХ равномерно разогретого ПЭ вблизи его

экстремума. Далее указывается, что эффективным путём уменьшения неравномерностей температурного поля ПЭ является увеличение толщины ПЭ, то есть снижение частоты и увеличение рабочего порядка колебаний. Поэтому наряду с соображениями лучшей долговременной стабильности частоты прецизионные РТ обычно разрабатывают на частоты не выше 10 МГц с колебаниями на обертонах (3-я, 5-я механическая гармоника). Также путём уменьшения температурных градиентов в РТ и в ПЭ являются увеличение теплового сопротивления стоек держателей и увеличение теплоёмкости и теплопроводности основания камеры. Однако увеличение теплоёмкости основания увеличивает время разогрева и при увеличении массы снижает стойкость конструкции к механическим воздействиям. Также показано, что применение линзовых ПЭ снижает влияние температурных градиентов на его частоту. Это связано с тем, что в линзовых ПЭ активные колебания сосредоточены в их центре, в зоне, где неравномерность температурного поля значительно меньше, поскольку на периферии ПЭ существуют тепловые потоки через держатели.

Как отмечено в [75, с. 201] важным преимуществом резонаторов ТД-среза является их низкая чувствительность к быстрым изменениям температуры. Кратковременное изменение частоты, обусловленное механическими напряжениями в ПЭ вследствие возникающих при этом температурных градиентов, значительно превышает изменение частоты, которое определяется статической ТЧХ. Для примера, в ТСКГ при изменении температуры на $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ с периодом 5 с изменение частоты резонаторов АТ-среза составляет 10^{-8} , в то время как медленные изменения температуры порядка 1 ч вызывают колебания частоты на два порядка меньше (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1

Относительное изменение частоты резонаторов АТ в зависимости от амплитуды и периода температурных циклов

Период изменения температуры	Изменения относительной частоты $\Delta f/f$ при различных амплитудах изменения температуры
------------------------------	---

	0,01 °С	0,001 °С
1 мин	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
1 ч	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$
1 сут	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$

По данным [76] температурно-динамический эффект у резонаторов SC-среза на два порядка меньше, чем у резонаторов АТ-среза, что также является преимуществом в стабильности частоты при изменении температуры среды в установившемся режиме. Это справедливо и для резонаторов ТД-среза.

Резонаторы других двухповоротных срезов по значению температурно-динамического эффекта частоты занимают промежуточное положение между срезами АТ и ТД (SC).

Малое значение ТДКЧ является также определяющим преимуществом резонаторов ТД-среза при установлении частоты в режиме начального разогрева.

На рис. 1.6 приведены типичные характеристики начального установления частоты КГ с резонаторами АТ₃ и ТД₃ с частотой 5 МГц из [75, с. 202].

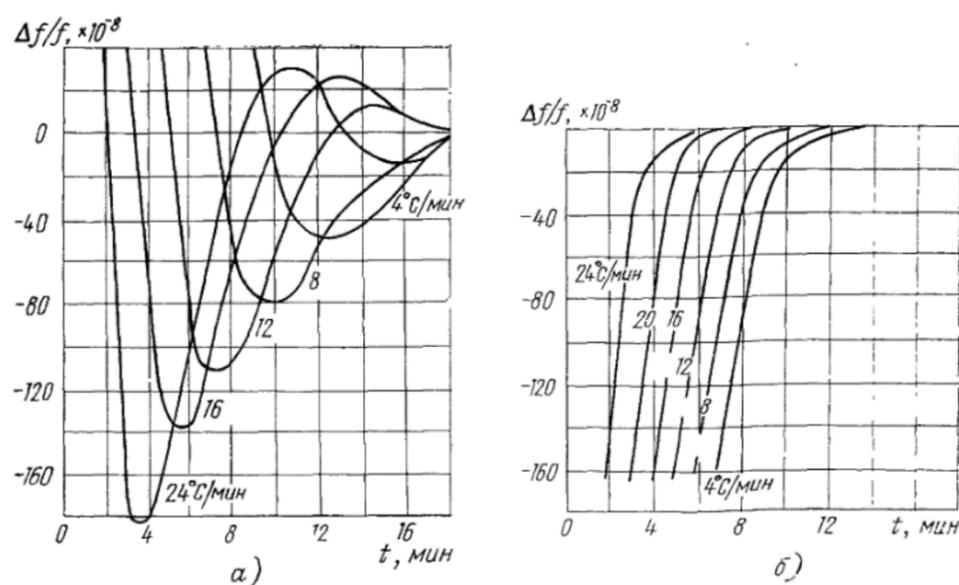


Рис. 1.6 Временные зависимости изменения частоты резонаторов при различной скорости нагрева: а – АТ; б – ТД

Данные графики иллюстрируют, что для резонаторов АТ повышение скорости нагрева термостата практически не уменьшает время установления

частоты из-за выбросов частоты, увеличивающихся с увеличением скорости изменения температуры. В случае применения резонаторов ТД-среза таких выбросов не наблюдается.

Для исключения влияния переменной составляющей тока подогрева, обусловленной инерционностью системы терморегулирования, нагреватель в РТ с косвенным подогревом ПЭ расположен на отдельном от ПЭ элементе конструкции и подогрев последнего осуществляется теплопроводностью через держатели ПЭ и посредством теплового излучения. При этом посредством вакуумирования РТ, применения теплоизолирующих держателей внутренней конструкции и напыления на внутреннюю поверхность колбы теплоотражающих покрытий мощность подогрева практически тратится только на ПЭ и элемент с нагревателем. Такой способ подогрева ПЭ, называемый косвенным, позволил на порядок уменьшить массу, вес и потребляемую мощность. Масса генераторов снизилась до десятков грамм, габариты – до нескольких сантиметров, Мощность разогрева уменьшилась до единиц Ватт в режиме разогрева и до 0,5 Вт в установившемся режиме.

Рис. 1.7 по данным из [24] графически отображает время установления частоты ТСКГ разработанных в различные годы с 1967 по 1995г.

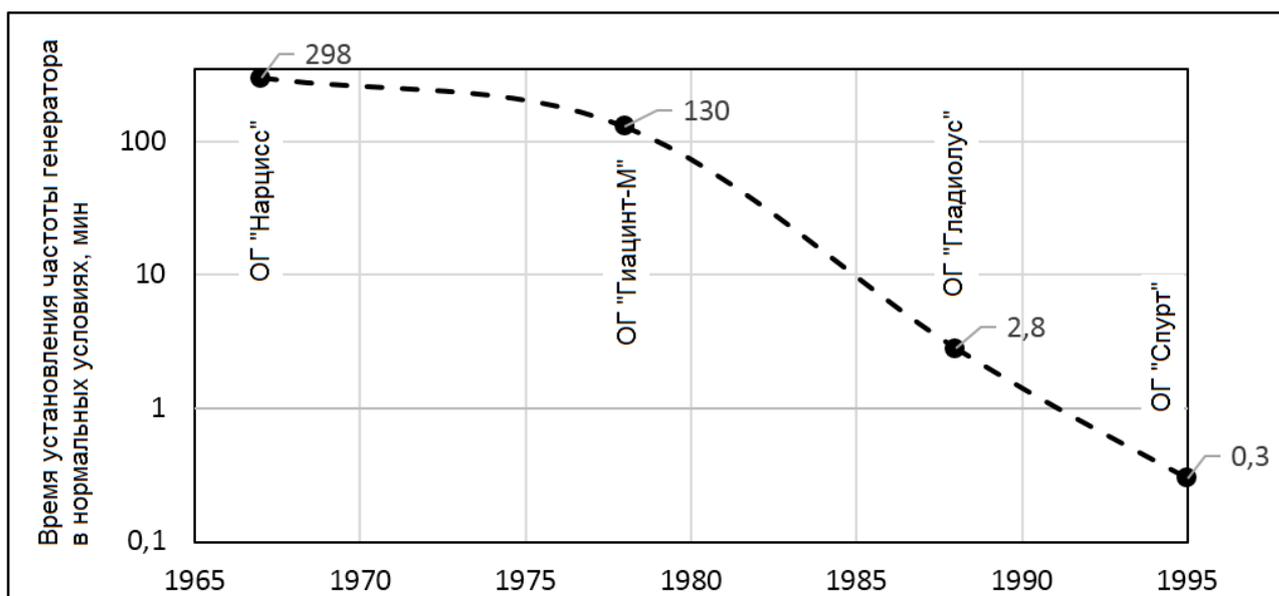


Рис. 1.7. Уменьшение времени установления частоты ТСКГ с 1967 г. по 1995 г.

Одновременно проводились эксперименты по разработке конструкций РТ, которые имели напылённый по периметру ПЭ нагреватель (см. рис. 1.8) [77-84].

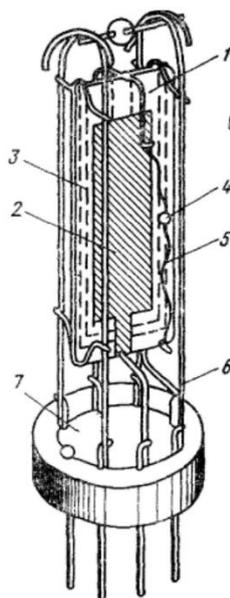


Рис. 1.8. Конструкция РТ с плёночным нагревателем и датчиком температуры непосредственно на ПЭ: 1 – ПЭ; 2 – тонкоплёночный электрод; 3 – тонкоплёночный нагреватель; 4 – бусинковый терморезистивный датчик температуры; 5 – отводы терморезистивного датчика температуры; 6 – стойка держателя; 7 – основание корпуса РТ

Такой способ термостатирования называется прямым или непосредственным подогревом ПЭ [82] в отличие от косвенного подогрева, когда нагреватель находится внутри кварцевого РТ, но вне пределов ПЭ.

КГ с прямым подогревом ПЭ имеют наименьшие габаритные размеры и энергопотребление среди ТСКГ.

Нанесение нагревателей на поверхность кварцевой пластины ПЭ позволяет достичь наименьшего времени готовности ТСКГ (до десятков секунд с точностью $1 \cdot 10^{-7}$ в диапазоне рабочих температур от -60 °С до 70 °С).

ТСКГ с применением данного способа термостатирования широкого распространения не получили, поскольку мощность подогрева выделялась непосредственно вблизи электродов ПЭ, и переменная составляющая тока подогрева преобразовывалась в колебания частоты, что ухудшало кратковременную нестабильность частоты (КНЧ) и уровень спектральной

плотности мощности фазовых шумов генератора в ближней зоне, то есть в области с отстройкой от несущей менее 100 Гц.

Разработанный в 1995 г. ТСКГ «Спурт» имел РТ, в котором ПЭ термостатируется непосредственно с помощью напылённых на его поверхность плёночных нагревателей и имеет время готовности не более 15 с в нормальных условиях.

В настоящее время к характеристикам прецизионных ТСКГ предъявляются всё более высокие требования. ТСКГ должны обладать высокой температурной, кратковременной и долговременной стабильностью, низким уровнем спектральной плотности мощности односторонних фазовых шумов, низким энергопотреблением и одновременно иметь малые габаритные размеры и малое время готовности.

В [85, 86] был предложен комбинированный способ подогрева ПЭ, при котором при включении генератора происходит одновременный подогрев одинаковой мощностью микроплаты (МП) (в тексте патента «основания») с нагревателем-транзистором и ПЭ напылённым плёночным нагревателем. Условием устойчивой работы терморегулятора при этом являются одинаковая теплоёмкость и равная мощность разогрева МП и ПЭ [86]. При включении происходит одновременный разогрев МП и ПЭ максимальным током начального разогрева. Затем при увеличении температуры на ПЭ пропорциональный терморегулятор, реализованный на прецизионном усилителе постоянного тока, входит в режим поддержания температуры, и ток снижается до значения установившегося режима, температура на ПЭ достигает температуры его экстремума. При этом практически вся мощность подогрева, выделяется на МП, а мощность, выделяемая на ПЭ падает почти до нуля. Таким образом в режиме начального разогрева происходит прямой подогрев ПЭ, а в установившемся режиме – косвенный.

Данное техническое решение, используя распределённый нагреватель ПЭ, позволяет при изменении температуры окружающей среды в установившемся режиме уменьшить влияние плёночного нагревателя на градиенты температуры

пьезоэлемента, вызывающие механические напряжения в пьезоэлементе и приводящие к отклонению частоты [13]. Также уменьшается влияние переменной составляющей системы терморегулирования обусловленной её инерционностью, ухудшающей кратковременную нестабильность частоты (КНЧ) и увеличивающей уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов в ближней зоне, поскольку переменная составляющая мощности вызывает флуктуации температуры пьезоэлемента, преобразующиеся во флуктуации частоты [87]. Таким образом способ комбинированного подогрева ПЭ совмещает преимущества прямого и косвенного подогрева ПЭ. Данный способ подогрева ПЭ также описан в [88-93].

В конструкции используется пьезоэлемент ТД-среза, работающий на 3-й механической гармонике, с небольшим температурно-динамическим коэффициентом частоты (ТДКЧ), уменьшающим выброс частоты при разогреве [75, с. 64], что позволяет РТ с распределённым нагревателем обеспечить время установления частоты менее 30 с в широком диапазоне рабочих температур от -60 °С до 70 °С.

В таблице 1.2 приведено качественное сравнение современных способов уменьшения температурной нестабильности кварцевых генераторов, дающее общее представление о преимуществах и недостатках каждого из способов.

Таблица 1.2

Сравнение способов уменьшения температурной нестабильности кварцевых генераторов

Параметры	ТККГ	ТСКГ с внутренним подогревом РТ		
		ТСКГ с прямым подогревом	ТСКГ с косвенным подогревом	ТСКГ с комбинированным подогревом
Способ термостатирования пьезоэлемента	Нет			
Энергопотребление	Очень низкое	Низкое	Низкое	Низкое

Время установления частоты	Малое	Малое	Большое	Малое
Уровень фазовых шумов	Низкий	Высокий	Низкий	Низкий
Кратковременная нестабильность частоты	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая
Долговременная нестабильность частоты	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая
Температурная нестабильность частоты	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая

В данной таблице не рассматриваются ТСКГ с внешним термостатированием, поскольку в настоящее время из-за неудовлетворительных технических характеристик такие генераторы не применяются.

1.2. Анализ современных моделей прецизионных ТСКГ, имеющих минимальное время выхода на режим

В результате исследования существующих на настоящий момент моделей прецизионных ТСКГ, имеющих минимальное время выхода на режим, то есть время установления частоты при включении, были определены несколько изделий. В таблице 1.3. представлено сравнение их характеристик.

Таблица 1.3

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

Параметр	M32008	MXO37/8P Magic Xtal	SCOCXOL
----------	--------	------------------------	---------

	АО «ОНИИП»		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	<u>15 секунд</u>	15 секунд	15 секунд
Максимальное время установления частоты в диапазоне рабочих температур, не более,	<u>30 секунд</u> <u>(-60 °С)</u>	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, 100 Гц 1000 Гц 10 кГц и выше	- 118 - 145 - 155 - 160	- 125 - 145 - 155 - 165	- 90 - 120 - 130 - 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 с при минимальном значении диапазона рабочих температур -60 °С. Данный генератор имеет комбинированный подогрев ПЭ.

Дальнейшее уменьшение времени установления частоты, приближающееся к пределу, невозможно без исследования динамики тепловых процессов в элементах конструкции резонатора-термостата в режиме разогрева.

1.3 Анализ известных методов расчёта и теплового моделирования резонаторов-термостатов.

Известен метод теплового моделирования РТ, при котором тепловые расчёты становятся возможными за счёт упрощения модели, приведения элементов конструкции к нескольким функциональным блокам (рис. 1.9).

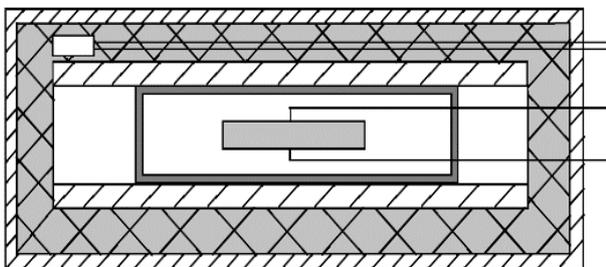


Рис. 1.9. Представление модели термостата с приведением элементов конструкции к нескольким функциональным блокам.

Так в [94] приводятся методы 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, теплоёмкости 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.

Кроме значительной степени приближенности данный метод также не позволяет рассчитать динамическое распределение температурного поля в элементах конструкции РТ и, соответственно, не связывает это температурное поле с частотой генерации.

Метод электротепловой аналогии предлагает замену тепловых процессов на аналогичные им электрические и представление схемы в виде комбинации RC-цепочек. [85, 95, 96] Метод нагляден, но определение эквивалентных значений резисторов и ёмкостей трудоёмко и неточно. В частности, в [85] тепловая модель РТ, содержащего пьезоэлемент, закреплённый на основании и два нагревателя, включенных последовательно (плёночный на пьезопластине и объёмный на основании) имеет следующий вид (см рис. 1.10).

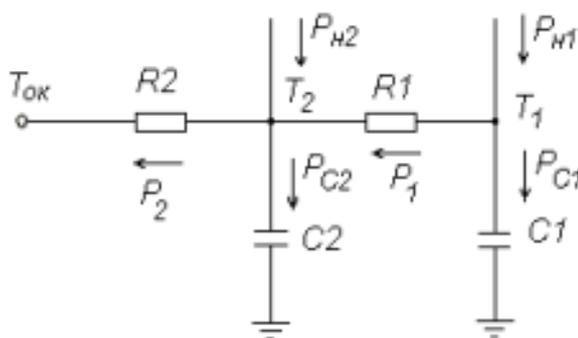


Рис. 1.10. Тепловая модель РТ на основе электротепловой аналогии

Здесь ПЭ и МП представлены в виде математических точек, 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.

Решить вопросы снижения ВУЧ может помочь разработка пространственной тепловой модели, максимально точно описывающей процессы, происходящие в реальном КРТ и расчёты на ней численным методом.

В данной работе предлагается использование и исследование метода трёхмерного теплового моделирования РТ методом конечных элементов. Такой метод позволяет точно учитывать конструктивные особенности РТ, и для его выполнения необходимы только точные чертежи изделия и теплофизические параметры используемых материалов.

Данный метод применялся в исследованиях, описанных в [97-101].

На рис. 1.11 приведён пример расчёта температурного поля РТ на трёхмерной тепловой модели методом конечных элементов [97].

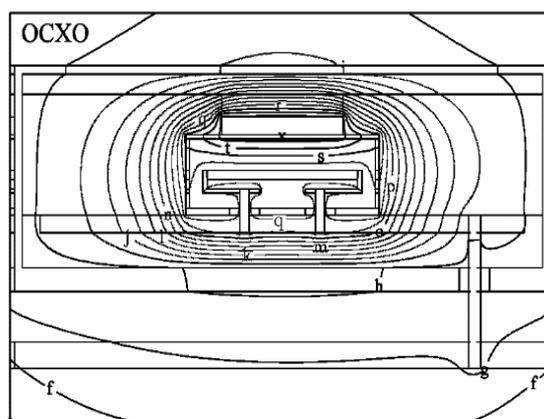


Рис. 1.11. Пример расчёта температурного поля РТ методом конечных элементов в виде расположения изотерм в плоскости XZ трёхмерной тепловой модели

Другие существующие методы расчёта при требуемой точности не дают удовлетворительных результатов.

Таким образом, при рассмотрении проблемы уменьшения времени установления частоты прецизионных ТСКГ необходимо исследовать динамику тепловых процессов, протекающих в ПЭ ТД-среза при начальном разогреве при помощи распределённого нагревателя от температуры окружающей среды до

температуры статирования, и оптимизировать конструкцию генератора с целью уменьшения температурных градиентов в ПЭ в режиме разогрева.

1.4. Результаты анализа объекта и предмета исследования.

Тепловая модель резонатора-термостата с распределённым нагревателем, приведена на рис. 1.12 [93].

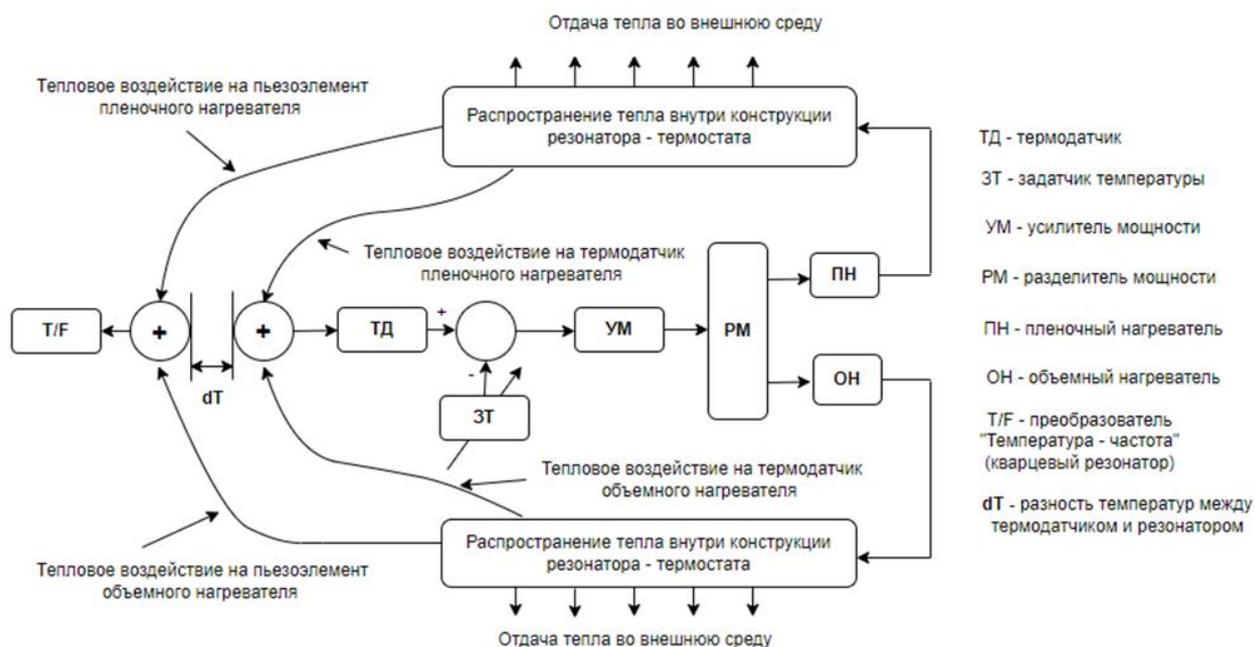


Рис. 1.12. Тепловая динамическая модель резонатора-термостата

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. 1.13.

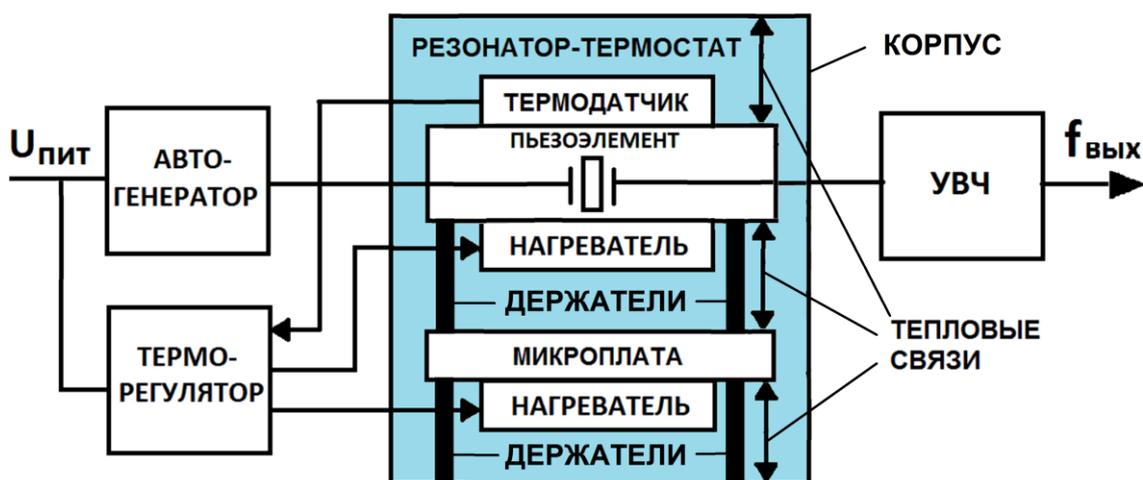


Рис. 1.13. Функциональная схема термостатированного кварцевого генератора с распределённым нагревателем пьезоэлемента

Между ПЭ, МП и корпусом резонатора существуют тепловые связи, обусловленные теплопроводностью и теплоёмкостью как держателей, так и самих ПЭ и МП, 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 [86].

Несоответствие конструкции данным требованиям приводит к колебаниям мощности, выделяемой в нагревателях, при начальном разогреве резонатора, приводящим к значительным колебаниям частоты, превышающим значение точности её установления (типовое значение – $1 \cdot 10^{-7}$ относительно номинального значения), и таким образом к увеличению времени её установления. В этом случае колебания мощности являются медленно затухающими или незатухающими. На рис. 1.14 представлен график установления частоты такого ТСКГ, полученный экспериментально и иллюстрирующий колебания выходной частоты с амплитудой относительного отклонения более $1 \cdot 10^{-7}$.

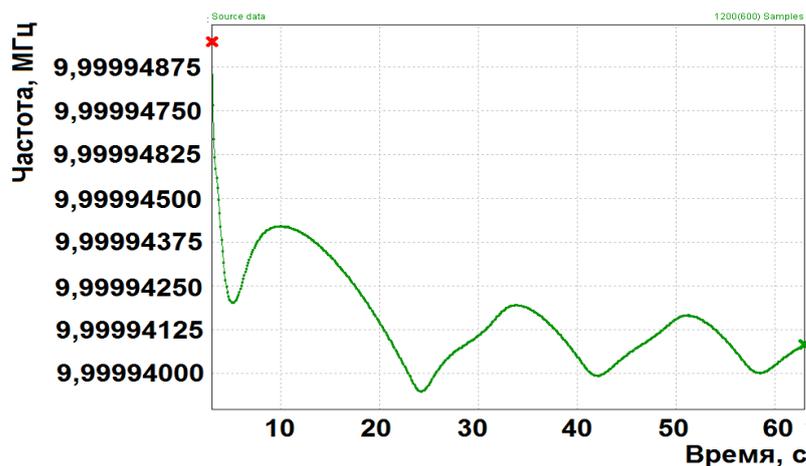


Рис. 1.14. График установления частоты со значительными колебаниями мощности подогрева и колебаниями частоты $>1 \cdot 10^{-7}$.

В результате проведённого анализа были определены конструктивные и физические факторы, оказывающие влияние на динамику температурного поля в РТ генератора и на время установления ТСКГ:

- 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.
- мощность, выделяемая в зоне электромеханических колебаний ПЭ;

Следует отметить, что распределение амплитуд колебаний на электродах ПЭ не является фактором, оказывающим влияние на динамику температурного поля в РТ, однако при наличии нестационарных температурных градиентов в области электродов теоретически возможно влияние данного фактора на изменение частоты генерации, и данный вопрос должен быть исследован.

Выводы

Обзор имеющихся на сегодняшний день представленных на рынке моделей прецизионных ТСКГ с минимальным временем установления частоты и их характеристик, анализ известных способов стабилизации частоты и схемно-конструктивных решений и существующих методов расчёта и теплового моделирования резонаторов-термостатов позволяют сделать вывод о том, что для достижения цели диссертационной работы – определения возможности и путей уменьшения времени установления частоты прецизионных ТСКГ – необходимо:

- провести анализ конструктивных и физических факторов, влияющих на тепловые процессы в резонаторе-термостате;
- разработать пространственную температурно-динамическую модель резонатора с распределённым подогревом пьезоэлемента, включающей электрическую схему терморегуляции, учитывающую комплекс влияющих конструктивных и физических факторов и позволяющую определить время установления частоты генератора для любой конструкции резонатора-термостата;
- на основе созданной модели разработать конструкцию резонатора-термостата для прецизионного ТСКГ с распределённым подогревом ПЭ ТД-среза на номинальную частоту 10 МГц. при помощи исследования динамики температурного поля резонатора в режиме разогрева и расчётов частотно-временной характеристики генератора на разработанной модели;
- провести экспериментальные исследования макетов ТСКГ с РТ разработанной конструкции.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТРЁХМЕРНОЙ ТЕМПЕРАТУРНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА-ТЕРМОСТАТА

2.1 Математическая и топологическая составляющие трёхмерной температурно-динамической модели резонатора-термостата

В ходе работы, описанной в [102] на основании анализа объекта и предмета исследования, разработана пространственная температурно-динамическая модель резонатора с распределённым подогревом пьезоэлемента [98]. Модель 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 2.1 представлена конструкция РТ с распределённым нагревателем ПЭ, трёхмерную структуру которой необходимо описать в модели.

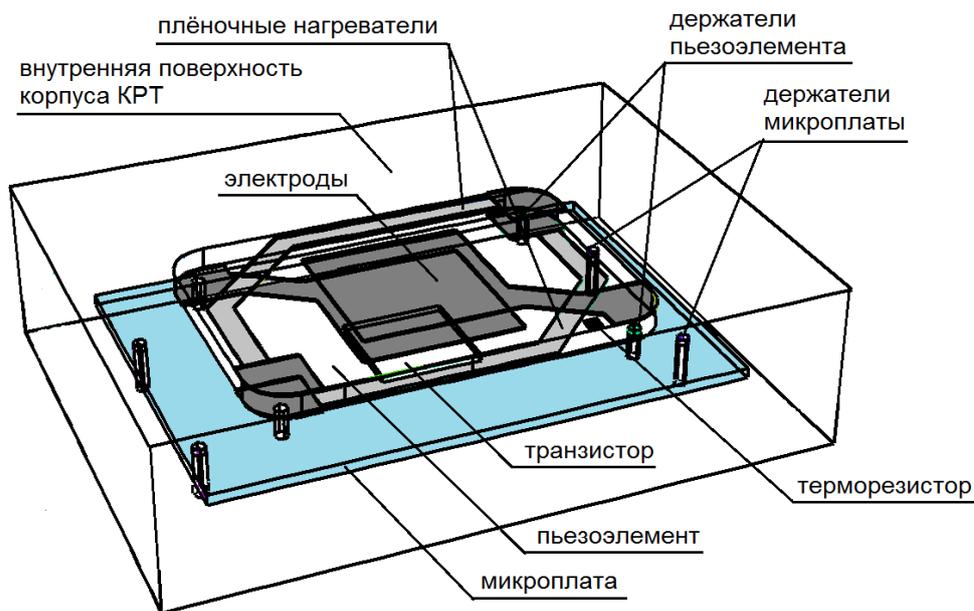


Рис. 2.1. Конструкция РТ с распределённым подогревом пьезоэлемента

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

Данный КРТ имеет конструкцию, соответствующую [85,86] для обеспечения равномерного разогрева МП и ПЭ. Для упрощения расчётов будем считать, что за время разогрева ПЭ до температуры статирования стенки корпуса КРТ, имеющие в начальное время, как и все элементы конструкции, температуру окружающей среды T_u , не успевают прогреться, ввиду низкой теплопроводности держателей, которыми МП крепится к основанию корпуса. Тогда топология трёхмерной модели ограничится объёмом, заданным внутренней поверхностью корпуса КРТ, имеющей постоянную температуру, равную T_u , в любой момент времени. МП из керамики ВК-100 крепится четырьмя нихромовыми держателями, выполненными в соответствии с [71], к нижней внутренней поверхности корпуса. Также для упрощения расчётов будем считать толщину плоско-выпуклой пластины ПЭ одинаковой во всех точках, поскольку радиус сферы выпуклой поверхности достаточно велик (300 мм). ПЭ устанавливается на МП также с помощью четырёх держателей из никеля. В центре нижней стороны на МП установлен транзистор, выполняющий роль её нагревателя.

В модели для каждого элемента конструкции в соответствии с его топологией задаются граничные условия в трёхмерной декартовой системе координат. Топологическая модель имеет многослойную структуру, элементы конструкции вписываются в её слои (рис. 2.2).

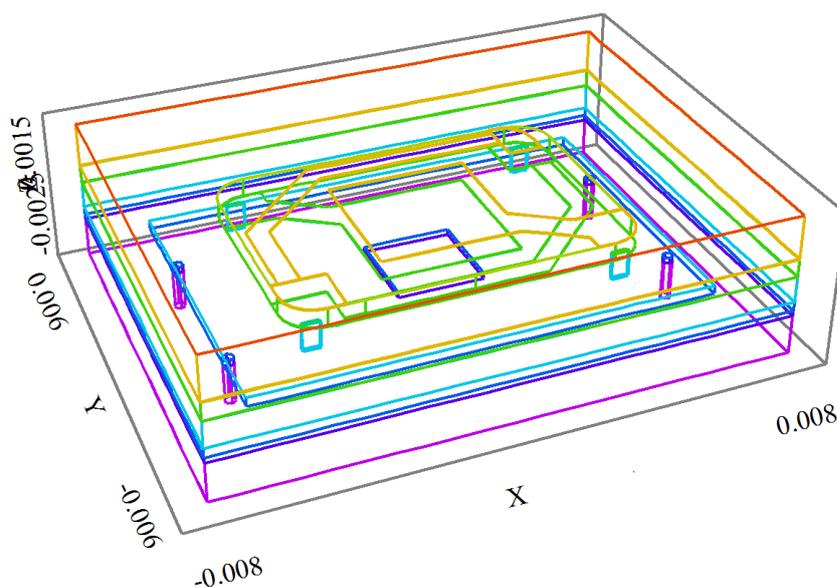


Рис. 2.2. Структура топологической модели резонатора

Также для каждого элемента задаются значения плотности и зависимой от температуры теплопроводности и теплоёмкости в соответствии с материалом, из которого они изготовлены. Все материалы конструкции кроме кварца изотропны. Поэтому значения теплопроводности таких элементов одинаково в направлении любой из осей координат и взято из справочных данных [103, с. 92] и [104, 105. 106].

Пластина ПЭ вырезается под определёнными углами из кристалла пьезокварца, изготовленного искусственно (рис. 2.3, 2.4) [1, с. 7].

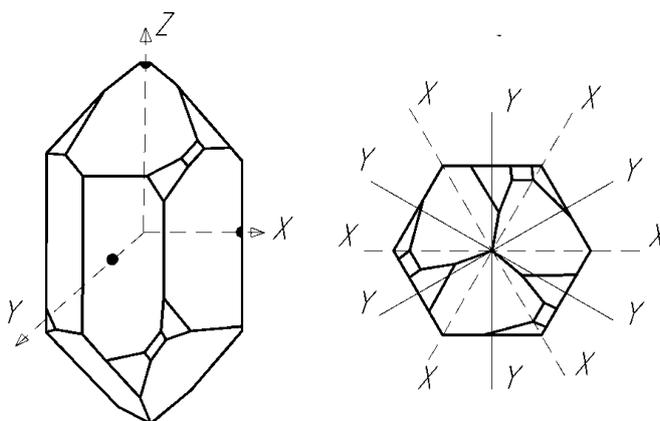


Рис. 2.3. Оси кристалла кварца

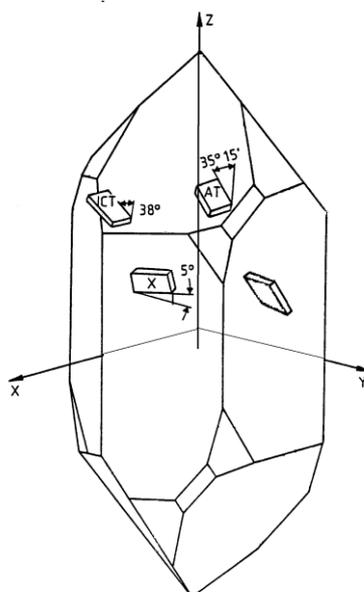


Рис. 2.4. Ориентация различных срезов в кристалле кварца

Поскольку ПЭ изготовлен из кварцевой пластинки ТД-среза, имеющей два поворота относительно кристаллографических осей ($uxb1/\varphi/\Theta$, $23,25^\circ$, 34°) (рис.

2.5), то необходимо рассчитать величину теплопроводности по каждой оси в системе координат модели.

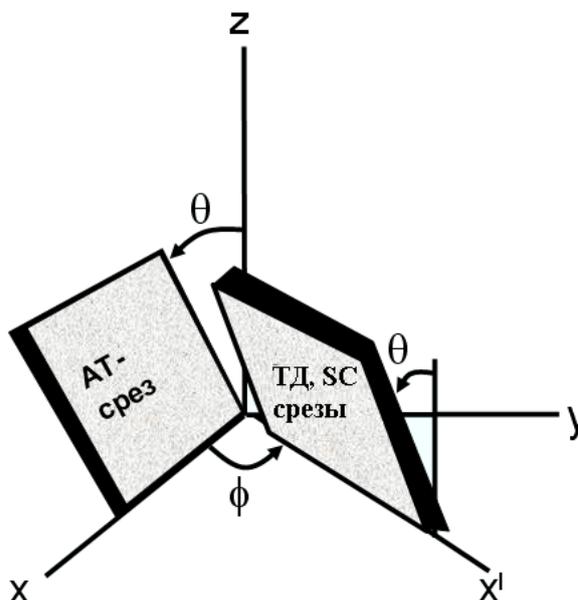


Рис. 2.5 Углы поворота пьезоэлементов одноповоротного АТ-среза и двухповоротного ТД-среза (SC-среза) относительно кристаллографических осей

Данный срез не повернут относительно кристаллографической оси кварца Z , и теплопроводность кварца по этой координате взята из справочных данных (теплопроводность перпендикулярно оптической оси кварца) [103, с. 91].

По осям X и Y системы координат модели теплопроводность для данного среза рассчитывается по тем же справочным данным для теплопроводности перпендикулярно и параллельно оптической оси кристалла кварца по формуле [103, с. 91,],

$$\lambda(\Theta) = \lambda_1 \sin^2(\Theta) + \lambda_3 \cos^2(\Theta), \quad (2.1)$$

где λ_1 – удельная теплопроводность кварца перпендикулярно оптической оси, λ_3 – удельная теплопроводность кварца параллельно оптической оси. Полученные зависимости теплопроводности ПЭ ТД-среза ($y_{xbl}/\varphi/\Theta$, 23,25 °, 34 °) по осям координат модели X , Y , Z нелинейны и для упрощения расчётов линейно аппроксимированы (рис. 2.6) с максимальной погрешностью в диапазоне рабочих температур, не превышающей 5 %.

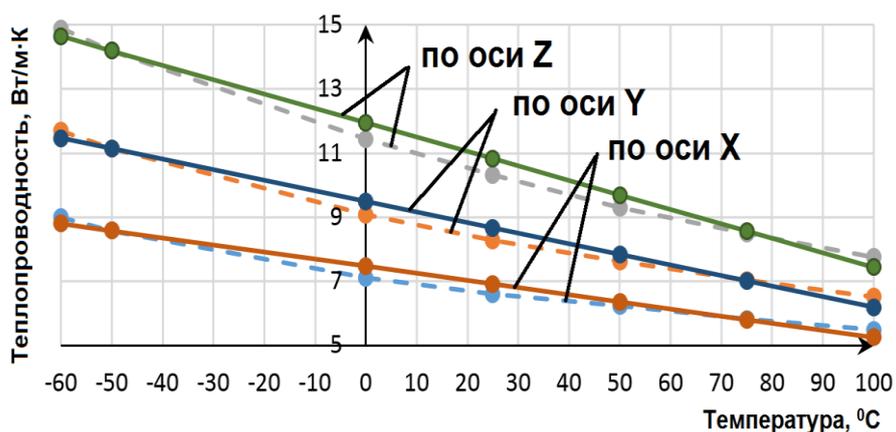


Рис. 2.6. Линейная аппроксимация (сплошные линии) зависимости теплопроводности кварцевого ПЭ ТД-среза от температуры (пунктирные линии) по осям координат модели X, Y, Z

Также для кварца на основе справочных данных [103, с. 92] построена зависимость теплоёмкости от температуры (рис. 2.7) и линейно аппроксимирована с погрешностью не более 2,5 %.

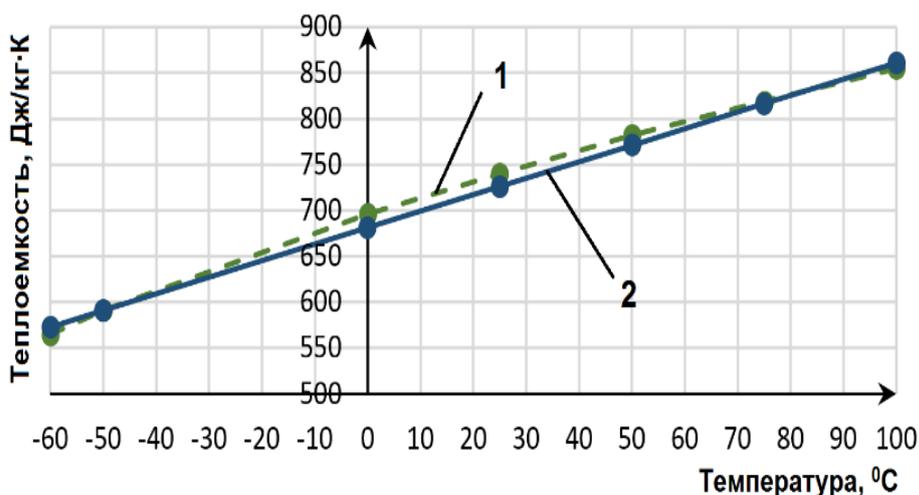


Рис. 2.7. Линейная аппроксимация зависимости теплоёмкости кварцевого ПЭ ТД-среза от температуры: 1 – справочные данные, 2 – линейно аппроксимированная зависимость

Максимальная погрешность линейной аппроксимации температурной зависимости теплопроводности и теплоёмкости остальных материалов на основе справочных данных [104, 105, 106] – не более 2%. Значения теплопроводности и теплоёмкости материалов конструкции в рабочем диапазоне температур

отличаются до 68%, поэтому их температурная зависимость должна учитываться 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 %.

2.2. Моделирование системы терморегулирования

Система терморегулирования является важным компонентом ТСКГ, обеспечивая начальный разогрев РТ и температурную стабильность генератора. Исследования в этой области опубликованы в большом количестве работ, например в [108-115].

На основе анализа выбран способ непрерывного терморегулирования ПЭ, наиболее подходящий для обеспечения минимального времени выхода прецизионного ТСКГ на режим РТ с распределённым нагревателем необходимой точностью термостатирования [85]. Данный способ термостатирования использует пропорциональный регулятор для РТ с распределённым нагревателем (рис. 2.8), 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 (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.

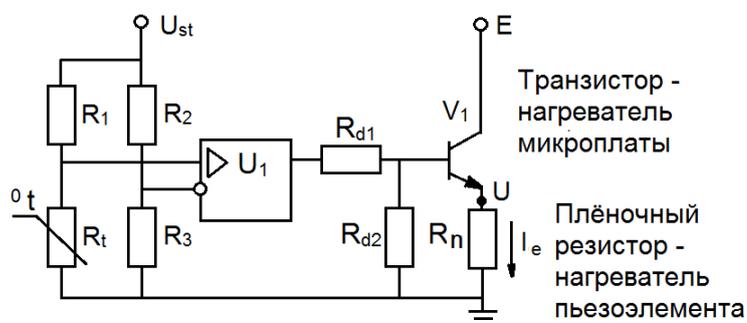


Рис. 2.8. Схема используемого пропорционального терморегулятора

Через оба нагревателя протекает электрический ток I_e . Терморегулятор КРТ с распределённым подогревом служит для разогрева ПЭ и МП от температуры окружающей среды таким образом, чтобы на электродах ПЭ поддерживалась температура статирования, равная температуре экстремума температурно-частотной характеристики (ТЧХ) ПЭ. Для моделирования системы терморегуляции необходимо математически описать зависимость мощности, выделяемой на нагревателях ПЭ и МП от температуры термодатчика, расположенного на ПЭ, электрическое сопротивление которого зависит от температуры. Зависимость сопротивления терморезистора, взятого для использования в модели, от температуры описывается формулой

$$R_t(T) = 0.095 \cdot e^{\frac{3750}{T}} \quad (2.2)$$

где T – температура в К. Инерционность работы терморезистора моделируется его топологией и физическими свойствами кремния. Инерционность электронной схемы терморегулятора по сравнению с термодатчиком мала, не оказывает существенного влияния и не учитывается. Согласно [85] мощность, выделяемая на плёночном резисторе-нагревателе ПЭ, и мощность на регулирующем транзисторе, расположенном на МП равны соответственно:

$$P_{n1} = \frac{U^2}{R_n}, \quad (2.3)$$

$$P_{n2} = \frac{(U \cdot (E - U))}{R_n}, \quad (2.4)$$

где E – напряжение питания терморегулятора; U – напряжение на эмиттере регулирующего транзистора; R_n – сопротивление плёночного резистора (нагревателя).

Напряжение на эмиттере регулирующего транзистора в зависимости от сопротивления терморезистора экспериментально измерено и аппроксимировано методом кусочно-линейной аппроксимации с погрешностью не более 2% (Рис. 4). На рабочем участке (участок 2-3, рис. 2.5) от $U_{\min}=0,2$ В до $U_{\max}=5,5$ В описывается выражением

$$U(T) = \left(\frac{U_{st} \cdot R_t(T)}{R_1 + R_t(T)} - E_{op} \right) \cdot K_{ou} \cdot m - U_{be} \quad (2.5)$$

где U_{st} – напряжение питания термоизмерительного моста, $E_{op}=U_{st}*R_3/(R_2+R_3)$, K_{ou} – коэффициент передачи усилителя U_1 , $m=R_{d1}/(R_{d1}+R_{d2})$ – коэффициент деления делителя напряжения, U_{be} – падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора V_1 . Вне рабочего участка U_e имеет значение $U_{min}=0,2$ В (участок 1-2, рис. 2.5) при $R_t < 4140$ Ом или $U_{max}=5,8$ В $R_t > 4640$ Ом (участок 3-4, рис. 2.9), что определено параметрами операционного усилителя. Участок 3-4 задает ток начального разогрева, который максимален до достижения рабочего участка терморегулирования 2-3.

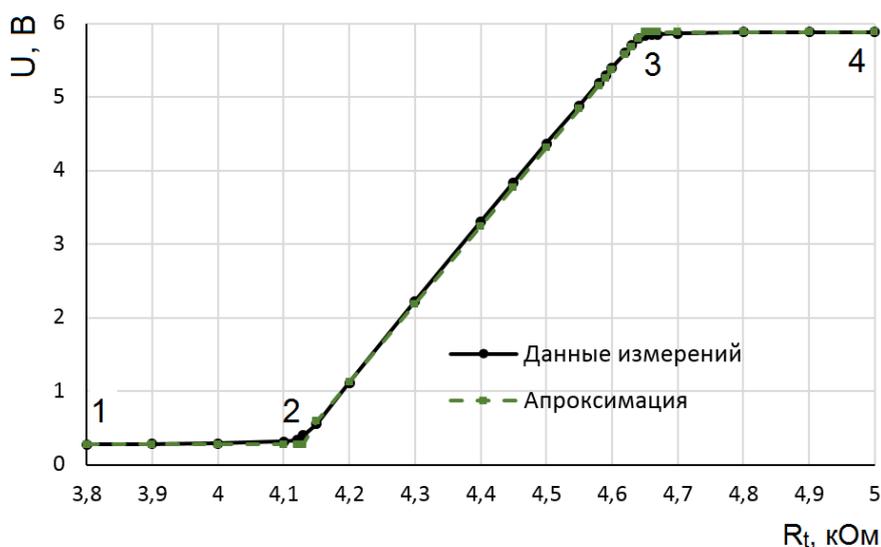


Рис. 2.9. Управляющая характеристика терморегулятора, данные измерений и кусочно-линейная аппроксимация

Также согласно [85] режим работы терморегулятора выбран таким образом, что в момент включения и во время разогрева напряжение на плёночном нагревателе таково, что на МП и на ПЭ выделяется мощность, примерно пропорциональная их теплоёмкостям (в данном случае они практически равны) и достаточная для обеспечения необходимого времени нагрева до температуры термостатирования. По мере приближения температуры ПЭ к температуре статирования напряжение U уменьшается до величины $U_{раб}$, мощности P_{n1} и P_{n2} уменьшаются в соответствии с выражениями (2.3, 2.4). Графики изменения мощностей P_{n1} , P_{n2} и общей мощности $P_{общ} = P_{n1} + P_{n2}$, выделяемой в РТ, приведены на рис. 2.10 также из [85].

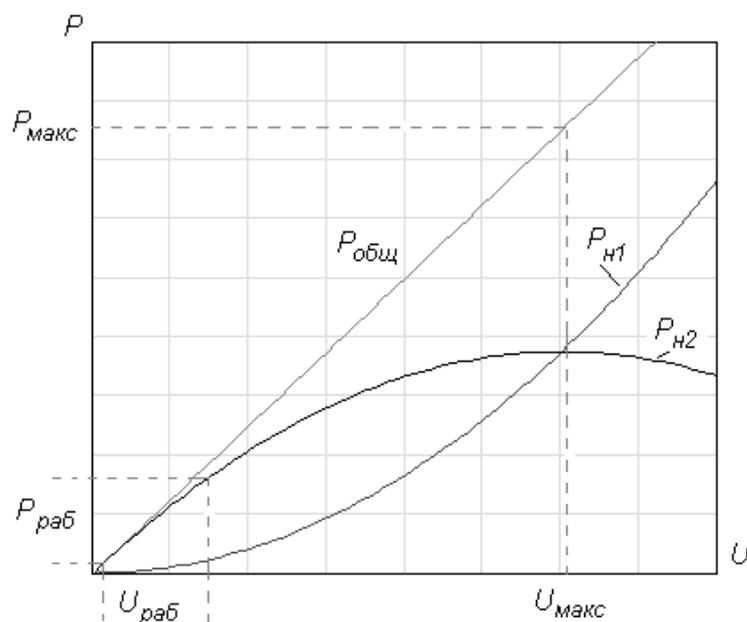


Рис. 2.10 Зависимость мощности, выделяемой в термостате, от величины напряжения U

В установившемся режиме, когда температура ПЭ равна температуре статирования, суммарная мощность $P_{общ}$ находится в пределах рабочей зоны терморегулятора $P_{раб}$, мощность, выделяемая на ПЭ, в k раз меньше суммарной мощности, выделяемой в термостате, где коэффициент k определяется соотношением

$$k = P_{н1} / (P_{н1} + P_{н2}) = U_{раб} / E. \quad (2.6)$$

Там же [85] отмечено, что на практике должно выполняться условие $k \ll 1$, тогда $U_{раб} \ll E$ и $P_{н1} \ll P_{н2}$. Таким образом, мощность, выделяемая нагревателем ПЭ, в k раз меньше общих тепловых потерь термостата, что приводит к снижению градиентов температур в ПЭ.

2.3. Математическая тепловая модель РТ

Тепловой поток, переизлучаемый между ПЭ и МП, между ПЭ и стенками корпуса РТ или между МП и стенками корпуса КРТ, согласно [105, с. 179] определяется выражением для лучистого теплообмена между телами с параллельными серыми плоскими поверхностями 1 и 2 площадью излучения S_1

и S_2 со степенью черноты ε_1 и ε_2 и температурой T_1 и T_2 соответственно ($T_1 > T_2$), выведенные на основании закона Стефана-Больцмана:

$$Q_{iz} = \varepsilon_{\Pi} \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.7)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{S_1}{S_2}(1/\varepsilon_2 - 1)}. \quad (2.8)$$

– приведённая степень черноты пьезоэлемента и стенок корпуса, C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, ε_1 и ε_2 – степень черноты, S_1 , S_2 – площади, T_1 и T_2 – температуры поверхностей между которыми происходит переизлучение тепловой энергии. Излучением с торцевых сторон ПЭ ввиду его малой толщины можно пренебречь.

Перенос тепла с элементов КРТ во внешнюю среду через остаточные газы в вакууме также должен быть учтён в модели, как значение теплопроводности на основе справочных данных.

Таким образом трёхмерная тепловая математическая модель РТ представляет собой систему 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

$$\operatorname{div}(q) - Q_{iz} + Q_v = c(T) \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (2.9)$$

$$\text{где } c(T) = d + e \cdot T \quad (2.10)$$

– удельная зависящая от температуры теплоёмкость элемента конструкции РТ, ρ – удельная массовая плотность элемента конструкции РТ, T – температура в рассчитываемой точке, t – время, d , e – коэффициенты аппроксимирующей линейной функции зависимой от температуры теплоёмкости, q – плотность теплового потока, описываемая вектором:

$$q = \operatorname{vector} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x}; \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y}; \lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.11)$$

$$\text{где } \lambda_x(T) = a_x + b_x \cdot T; \quad (2.12)$$

$$\lambda_y(T) = a_y + b_y \cdot T; \quad (2.13)$$

$$\lambda_z(T) = a_z + b_z \cdot T, \quad (2.14)$$

здесь $\lambda_x(T)$, $\lambda_y(T)$ и $\lambda_z(T)$ – удельная зависящая от температуры 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.

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 МП

$$Q_v = (P_{n1} + P_{n2}) / V_{nagr}, \quad (2.15)$$

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

$$P_{n1} = \frac{U^2}{R_n}, \quad P_{n2} = \frac{U \cdot (E - U)}{R_n}, \quad (2.16, 2.17)$$

где E – напряжение питания терморегулятора, R_n – сопротивление нагревателя ПЭ, U – напряжение на эмиттере транзистора – управляющая характеристика терморегулятора, математически описанная выше и являющаяся функцией от температуры

$$U = f(T_{td}), \quad (2.18)$$

где T_{td} – температура на термодатчике.

Напряжение U для терморегулятора, изображённого на рис. 3 описывается формулами (2.5) на рабочем участке 2-3 (рис. 2.5), на участке 1-2 $U=0.2$ В, на участке 3-4 $U=5.8$ В.

Лучистый теплообмен между элементами конструкции

$$Q_{iz} = P_{iz1} + P_{iz2} + P_{iz3} \quad (2.19)$$

Это сумма тепловых потоков:

Тепловой поток, переизлучаемый между МП и ПЭ [105]

$$P_{iz1} = \frac{1}{1/\epsilon_2 + \frac{S_2}{S_1}(1/\epsilon_1 - 1)} \cdot C_0 \cdot S_2 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.20)$$

Тепловой поток, переизлучаемый между ПЭ и корпусом [105]

$$P_{iz3} = \frac{1}{1/\epsilon_1 + \frac{S_1}{S_3}(1/\epsilon_3 - 1)} \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ок}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.21)$$

Тепловой поток, переизлучаемый между МП и корпусом [105]

$$P_{iz2} = \frac{1}{1/\varepsilon_2 + \frac{S_2}{S_3}(1/\varepsilon_3 - 1)} \cdot C_0 \cdot (S_2 \cdot 2 - S_1) \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ок}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.22)$$

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

Выражения 2.9-2.22 являются математической трёхмерной температурно-динамической тепловой моделью резонатора-термостата с распределённым подогревом ПЭ, управляемым пропорциональным терморегулятором, учитывающей конструктивные и физические факторы, влияющие на динамику тепловых процессов в режиме начального разогрева ПЭ. Решение системы дифференциальных уравнений (2.9-2.22) в частных производных с краевыми условиями по времени и с граничными условиями, определяемыми по трём осям координат топологией и теплофизическими свойствами элементов конкретной конструкции, позволяет методом конечных элементов рассчитать динамику тепловых процессов в КРТ в режиме разогрева для каждой конструкции.

2.4. Температурно-частотная характеристика РТ

Как было показано в [1], ещё одним фактором, влияющим на время готовности ТСКГ является зависимость частоты кварцевого ПЭ от температуры. Выходная частота термостатированного генератора зависит от температуры окружающей среды и в основном определяется температурно-частотной характеристикой (ТЧХ) ПЭ, то есть зависимостью частоты генерации от температуры на его электродах.

На рис. 2.11 представлена ТЧХ ПЭ термостабильного двухповоротного ТД-среза, применяемого в прецизионных термостатированных генераторах, построенная на экспериментально полученных данных [116].

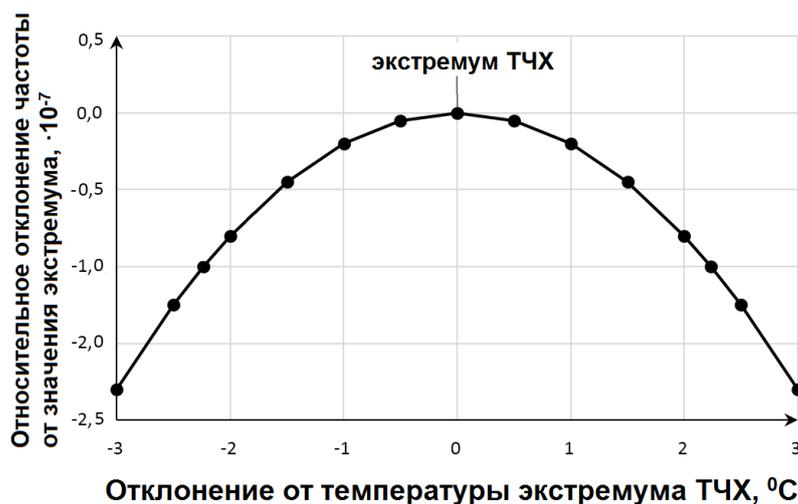


Рис. 2.11 Температурно-частотная характеристика ПЭ термостабильного двухповоротного ТД-среза

Как было сказано выше при включении ТСКГ требуется время для прогрева активной зоны ПЭ до температуры статирования, необходимой для обеспечения номинального значения выходной частоты ТСКГ с определённой точностью, поскольку скорость распространения тепловой энергии в ПЭ ограничена величиной удельной теплопроводности кварца. В общем виде температурно-частотную характеристику (ТЧХ) для каждого среза удобно представлять в виде степенной функции [74, с.60]

$$f(T) = a_0 + a_1(T_0 - T) + a_2(T_0 - T)^2 + a_3(T_0 - T)^3, \quad (2.23)$$

где коэффициенты a_1 , a_2 , a_3 – производные частоты по температуре соответствующих порядков, T_0 – произвольно выбранное значение температуры.

ТЧХ для резонаторов ТД-среза, имеющих вблизи температуры экстремума форму, близкую к квадратичной параболе, достаточно точно с погрешностью менее 0,1 % описывается выражением [74, с.61]

$$f(T) = a_2(T_1 - T)^2, \quad (2.24)$$

где T_1 – температура экстремума ТЧХ резонатора, $a_2 = -4,6 \cdot 10^{-9}$ для ТД-среза согласно измерениям, представленным в [116].

Из (2.23) следует, что для того, чтобы частота ТСКГ при включении установилась с точностью лучше $1 \cdot 10^{-7}$ в относительном выражении, интегральная температура в активной зоне колебаний ПЭ согласно принципу

суперпозиции должна повыситься от температуры окружающей среды, включая её минимально допустимое рабочее значение, и достигнуть значений, отличающихся от температуры статирования, равной температуре экстремума ТЧХ резонатора, приблизительно равного $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, менее чем на $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.12).

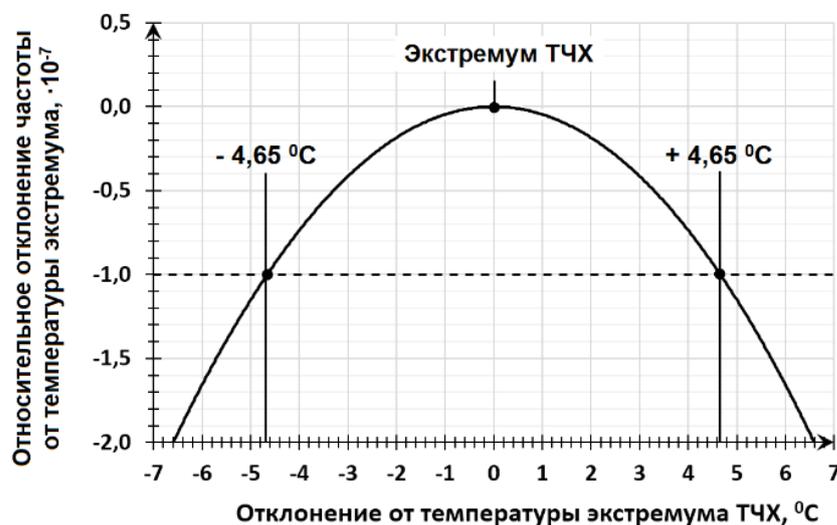


Рис. 2.12. Относительное отклонение частоты резонатора ТД- среза при отклонении температуры от температуры экстремума ТЧХ.

Из (2.24) следует, что для того, чтобы частота ТСКГ при включении установилась с точностью лучше $1 \cdot 10^{-7}$, интегральная температура в активной зоне колебаний ПЭ, согласно принципу суперпозиции, должна повыситься от температуры окружающей среды, включая её минимально допустимое рабочее значение, до значения, отличающегося от температуры статирования (экстремума температурно-частотной характеристики (ТЧХ) резонатора, приблизительно равного $75\text{ }^{\circ}\text{C}$) менее чем на $4,65\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 2.17 это значения параболы выше штриховой линии.

Расчёт ВУЧ КГ на пространственной температурно-динамической модели в этом случае сводится к определению времени с момента включения, когда отклонение интегральной температуры на электродах ПЭ от температуры статирования не будет превышать величину $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для этого необходимо рассчитать температурное поле в ПЭ с момента включения КГ до наступления установившегося режима. Интегральное (среднее) значение температуры на электродах вычисляется по формуле

$$T_{int}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy, \quad (2.25)$$

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 (2.24) в (2.23), получаем выражение

$$f(T) = (f_{ext} - a_2 \cdot (T_{ext} - \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy)^2) / f_{ext}. \quad (2.26)$$

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

Условием 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

$$F_T < (f_{ext} - a_2 \cdot (T_{ext} - \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy)^2) / f_{ext}. \quad (2.27)$$

Типовое относительное значение точности установления частоты, определяемое техническими требованиями для термостатированных генераторов $F_T = 1 \cdot 10^{-7}$. Таким образом, условие определения момента времени установления частоты с начала разогрева – это момент, с которого относительное отклонение частоты генератора от f_{ext} не превышает требуемого значения

$$\Delta f / f_{ext} = (f_{ext} - a_2 \cdot (T_{ext} - \frac{1}{S} \iint_D T(x, y) dx dy)^2) / f_{ext} < 1 \cdot 10^{-7}. \quad (2.28)$$

Условие определения времени установления частоты математически устанавливает зависимость частоты от интегральной температуры на электродах ПЭ. То есть выражение (2.27) позволяет, имея динамику температурного поля при начальном разогреве, рассчитать время установления частоты термостатированного генератора.

2.5 Исследование значимости учёта фактора теплового переизлучения между элементами конструкции РТ

Широко известен метод электротепловой аналогии, позволяющий расчёт тепловых потоков в элементах конструкций, имеющих различную теплоёмкость

и теплопроводность, и их теплообмен со средой, рассматривать с точки зрения их электрических аналогов: электрического тока, электрических мощностей, конденсаторов и проводимостей [95, с. 130-138, 96].

В [85] также была предложена электротепловая аналогия. Как было показано в работе, результаты моделирования позволяют оценить для конкретной конструкции кварцевого генератора время выхода на режим и мощность, необходимую для этого, начиная с момента включения до наступления установившегося режима. Это имеет большую практическую ценность, позволяя быстро рассчитать мощности и температуры и время установления частоты РТ в рабочем диапазоне температуры окружающей среды. Однако модель предполагает, что теплопередача излучением РТ сведена к минимуму и не учитывается, то есть не учитывается передача тепловой энергии излучением с основания на пьезоэлемент, с помощью которой в установившемся режиме наряду с теплопередачей через держатели осуществляется подогрев последнего. Также не учитываются потери мощности, необходимой для термостатирования РТ, на излучение теплового потока с основания и с пьезоэлемента на стенки корпуса РТ.

Для определения значимости учёта фактора теплового переизлучения между элементами конструкции РТ проведён анализ модели электротепловой аналогии, представленной в данной работе, построена уточнённая модель РТ, составлена система дифференциальных уравнений и решена численным методом во временной области с момента включения до наступления установившегося режима.

На рис. 2.13 (а) представлена конструктивная схема кварцевого РТ, предложенная в [85]. Такой РТ содержит в герметичном вакуумированном корпусе пьезоэлемент 1 с датчиком температуры 4 и плёночным нагревателем 2, предназначенным для быстрого разогрева пьезоэлемента при включении генератора. Пьезоэлемент при помощи держателей 5 установлен на основание 3, которое крепится к корпусу 7 при помощи теплоизолирующих держателей 6. На основании установлен транзистор-нагреватель 8, предназначенный для

поддержания температуры статирования пьезоэлемента в установившемся режиме. На рисунке 2.13(б) изображена электрическая схема соединения элементов терморегулятора статического типа, содержащего датчик температуры R_t , в качестве которого используется терморезистор, расположенный на пьезоэлементе, усилитель постоянного тока (УПТ) и распределённый нагреватель: транзистор V на основании и плёночный нагреватель R_H на пьезоэлементе.

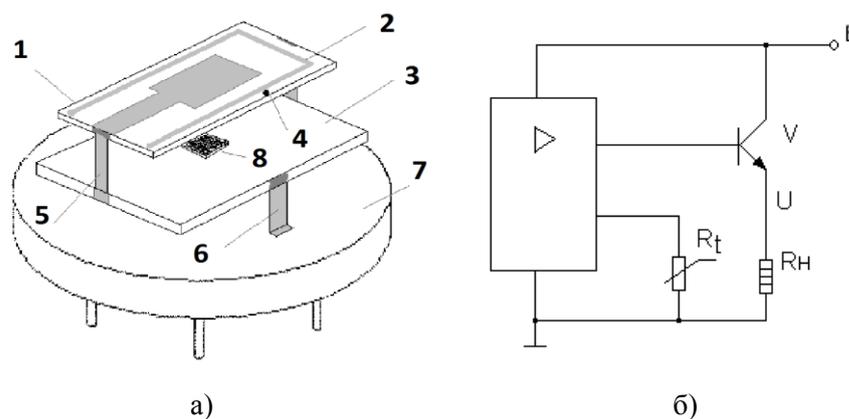


Рис. 2.13. Конструкция (а) и схема терморегулятора (б) кварцевого резонатора-термостата с распределённым нагревателем

Тепловая схема РТ на её основе изображена на рис. 1.10. В схеме приняты следующие обозначения: T_1 – температура пьезоэлемента; T_2 – температура основания; $T_{ок}$ – температура окружающей среды; C_1 – теплоёмкость пьезоэлемента; C_2 – теплоёмкость основания с размещёнными на нем элементами схемы; R_1 – тепловое сопротивление между пьезоэлементом и основанием; R_2 – тепловое сопротивление между основанием и окружающей средой; P_1 – тепловой поток от пьезоэлемента к основанию; P_2 – тепловой поток от основания в окружающую среду; P_{C1} – тепловая мощность, расходуемая на нагрев пьезоэлемента; P_{C2} – тепловая мощность, расходуемая на нагрев основания; $P_{н1}$ – мощность, выделяемая нагревателем на пьезоэлементе; $P_{н2}$ – мощность, выделяемая нагревателем на основании.

Далее в [85] представлена математическая модель кварцевого РТ в виде системы дифференциальных уравнений (1), описывающая переходные процессы в данной схеме на основе электротепловой аналогии:

$$\begin{cases} P_{H1} = P_1 + P_{C1} \\ P_{C1} = C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} \\ P_2 + P_{C2} = P_{H2} + P_1 \\ P_{C2} = C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} \end{cases} \quad (2.29)$$

Мощность, выделяемая на плёночном резисторе, и мощность на регулирующем транзисторе равны соответственно:

$$P_{H1} = \frac{U^2}{R_H}, \quad (2.30)$$

$$P_{H2} = \frac{(U \cdot (E - U))}{R_H}, \quad (2.31)$$

где E – напряжение питания терморегулятора; U – напряжение на эмиттере регулирующего транзистора; R_H – сопротивление пленочного резистора (нагревателя).

При использовании терморегулятора на основе операционного усилителя с мостовым датчиком температуры в работе были учтены его параметры: функция зависимости сопротивления термистора от температуры, коэффициент усиления терморегулятора и др.

Для исследования значимости фактора переизлучения тепла между элементами конструкции в данную схему были добавлены тепловые потоки лучистым теплообменом между основанием и пьезоэлементом P_{iz1} , между основанием и корпусом КРТ P_{iz2} , между пьезоэлементом и корпусом КРТ P_{iz3} и соответствующие тепловым потокам дополнительные тепловые проводимости Y_{iz1} , Y_{iz2} , Y_{iz3} . Уточнённая эквивалентная тепловая схема КРТ с дополнительными тепловыми потоками P_{iz2} , P_{iz1} , P_{iz3} и сопротивлениями R_{iz2} , R_{iz1} , R_{iz3} , изображенными темным цветом, величинами обратными тепловым проводимостям Y_{iz2} , Y_{iz1} , Y_{iz3} соответственно, представлена на рис. 2.14 [97].

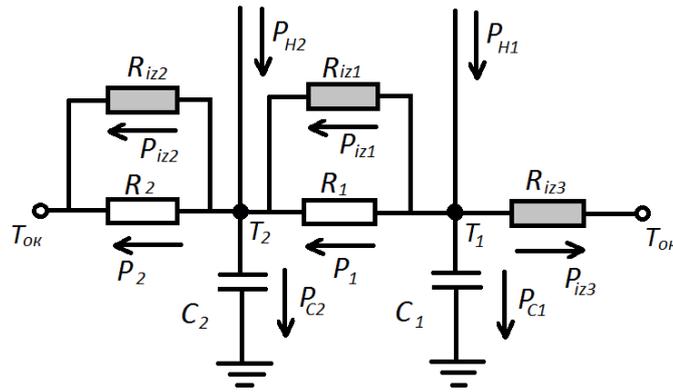


Рис. 2.14. Эквивалентная схема КРТ, дополненная тепловыми сопротивлениями R_{iz2} , R_{iz1} , R_{iz3} и соответствующими им тепловыми потоками P_{iz2} , P_{iz1} , P_{iz3} .

Для определения теплового потока, излучаемого между основанием и пьезоэлементом P_{iz1} . В [105, с. 179] приводятся расчётные формулы для лучистого теплообмена между телами с параллельными серыми плоскими поверхностями 1 и 2 площадью излучения F_1 и F_2 со степенью черноты ε_1 и ε_2 и температурой T_1 и T_2 соответственно ($T_1 > T_2$), выведенные на основании закона Стефана-Больцмана:

$$Q_{12} = \varepsilon_{\pi} \cdot C_0 \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (2.32)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{F_1}{F_2}(1/\varepsilon_2 - 1)}. \quad (2.33)$$

Для конструкции, описанной в [1] и изображённой на рис 1(а) тепловой поток, излучаемый между основанием и пьезоэлементом определяется следующим выражением:

$$P_{iz1} = \varepsilon_{\pi 21} \cdot C_0 \cdot S_2 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (2.34)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\pi 21} = \frac{1}{1/\varepsilon_2 + \frac{S_2}{S_1}(1/\varepsilon_1 - 1)} \quad (2.35)$$

– приведённая степень черноты основания и пьезоэлемента. Излучением с торцевых сторон основания и пьезоэлемента ввиду их малых толщин можно пренебречь.

Аналогично запишем выражение для теплового потока, излучаемого между пьезоэлементом и корпусом КРТ:

$$P_{iz3} = \varepsilon_{п13} \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{OK}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.36)$$

$$\text{где } \varepsilon_{п13} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{S_1}{S_3}(1/\varepsilon_3 - 1)} \quad (2.37)$$

– приведённая степень черноты пьезоэлемента и корпуса.

Тепловой поток, излучаемый между основанием и корпусом, определяется выражением:

$$P_{iz2} = \varepsilon_{п23} \cdot C_0 \cdot S_2 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{OK}}{100} \right)^4 \right] \cdot 2 - P_{iz1}, \quad (2.38)$$

$$\text{где } \varepsilon_{п23} = \frac{1}{1/\varepsilon_2 + \frac{S_2}{S_3}(1/\varepsilon_3 - 1)} \quad (2.39)$$

– приведённая степень черноты основания и корпуса.

В выражениях (2.32-2.39) S_1 – площадь одной стороны пьезоэлемента. S_2 – площадь одной стороны основания, S_3 – площадь внутренних стенок корпуса КРТ, ε_1 – степень черноты пьезоэлемента, ε_2 – степень черноты основания, ε_3 – степень черноты внутренних стенок КРТ, T_1 – температура пьезоэлемента, T_2 – температура основания, T_{OK} – температура внутренних стенок КРТ, принимаемая равной температуре окружающей среды, C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Дополним систему уравнений (1) тепловыми потоками лучистым теплообменом между элементами конструкции:

$$\begin{cases} P_{H1} = P_1 + P_{C1} + P_{IZ1} + P_{IZ3}, \\ P_{C1} = C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} \\ P_2 + P_{C2} + P_{IZ2} = P_{H2} + P_1 + P_{IZ1}, \\ P_{C2} = C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} \end{cases} \quad (2.40)$$

Полученные выражения (2.40) с учётом (2.30) и (2.31) являются уточнённой математической моделью КРТ, учитывающей передачу тепла излучением.

2.6. Результаты исследования значимости учёта фактора теплового переизлучения между элементами конструкции РТ

Путём расчёта по данной математической модели с параметрами РТ, описанного в [117], получены зависимости значений мощностей и температур

основания и пьезоэлемента от времени с момента включения ТСКГ до наступления установившегося режима для значений температуры окружающей среды от 223 К до 343 К [118]. Температура статирования пьезоэлемента – 348 К. Из графиков, приведённых на рис. 2.15 и 2.16, видно, что при температуре окружающей среды 293 К при расчётах с учётом и без учёта лучистого теплообмена, мощности и температуры основания и пьезоэлемента имеют разную динамику и в установившемся режиме – разные значения. Мощности P_{H1} , P_{H2} в режиме разогрева и время установления частоты $t_{уст}$ при этом практически не изменились.

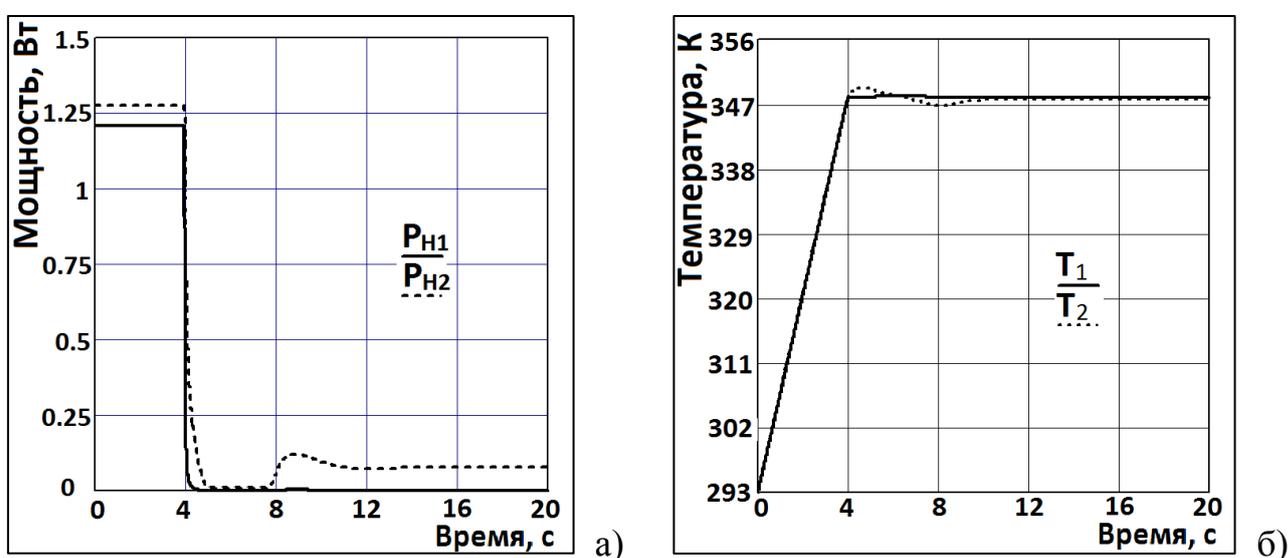


Рис. 2.15. Переходный процесс установления мощности подогрева (а) и температуры (б) в КРТ при температуре среды 293 К в модели без учёта излучения.

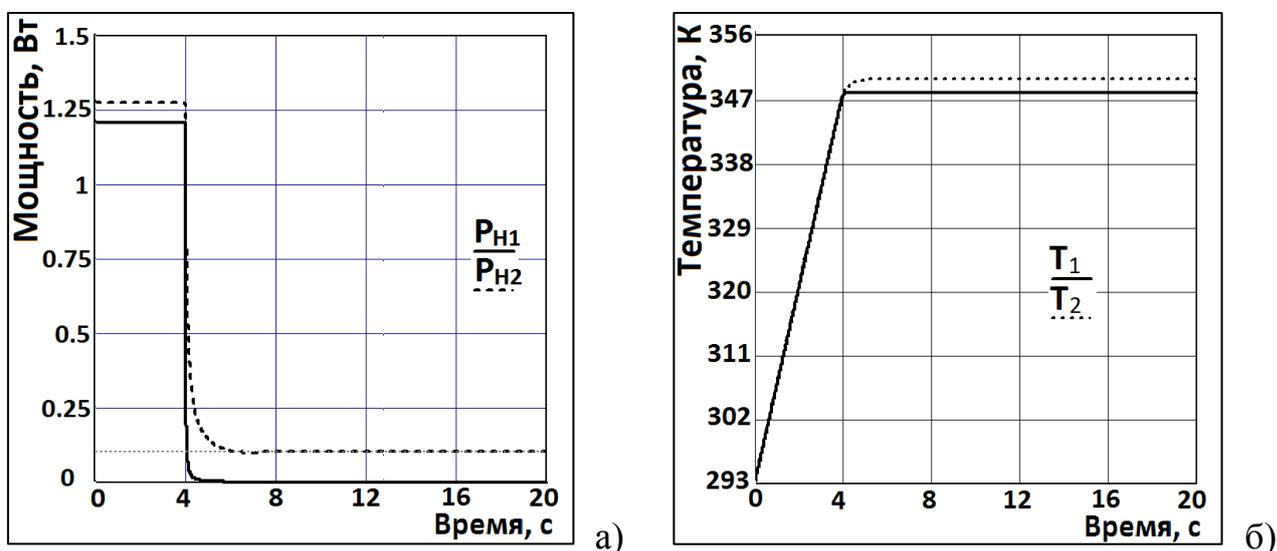


Рис. 2.16. Переходный процесс установления мощности подогрева (а)
и температуры (б) в КРТ при температуре среды 293 К
в модели с учётом излучения.

В таблице 2.1 приведены данные расчётов, позволяющие сравнить основные характеристики КРТ с учётом и без учёта лучистого теплообмена при различных температурах.

Таблица 2.1

Расчётные значения основных характеристик КРТ с учётом и без учёта
лучистого теплообмена при различных температурах.

Температура окружающей среды, К	Параметр КРТ	Без учёта лучистого теплообмена	С учётом лучистого теплообмена
223	$P_{н1}$ в режиме разогрева, Вт	1,21	1,21
	$P_{н2}$ в режиме разогрева, Вт	1,276	1,276
	$P_{н1}$ в установившемся режиме, Вт	0,0059	0,0096
	$P_{н2}$ в установившемся режиме, Вт	0,169	0,212
	T_1 в установившемся режиме, К	347,9	347,89
	T_2 в установившемся режиме, К	346,29	349,55
	Время установления частоты, $t_{уст}$, с	9,2	9,2
293	$P_{н1}$ в режиме разогрева, Вт	1,21	1,21
	$P_{н2}$ в режиме разогрева, Вт	1,276	1,276
	$P_{н1}$ в установившемся режиме, Вт	0,0012	0,0022
	$P_{н2}$ в установившемся режиме, Вт	0,076	0,104
	T_1 в установившемся режиме, К	347,92	347,92

	T_2 в установившемся режиме, К	347,61	349,78
	Время установления частоты, $t_{уст}$, с	4,0	4,0
343	$P_{н1}$ в режиме разогрева, Вт	1,21	1,21
	$P_{н2}$ в режиме разогрева, Вт	1,276	1,276
	$P_{н1}$ в установившемся режиме, Вт	0,00002	0,00002
	$P_{н2}$ в установившемся режиме, Вт	0,009	0,009
	T_1 в установившемся режиме, К	348,7	348,45
	T_2 в установившемся режиме, К	349,13	348,74
	Время установления частоты, $t_{уст}$, с	0,6	0,6

Сравнивая результаты расчётов, можно видеть, что учёт лучистого теплообмена в модели практически не оказывает влияния на такие показатели как максимальная мощность в режиме разогрева и время установления частоты. В то же время расчёт по уточнённой модели вносит поправки в значения температур T_1 и T_2 и динамику их изменения, а отклонение значений мощностей $P_{н1}$ и $P_{н2}$ в установившемся режиме при учёте лучистого теплообмена от значений без его учёта достигают величины 36% при температуре окружающей среды 293 К и 25% при температуре 223 К в сторону их увеличения, что составляет значимую величину, и данный фактор должен быть учтён в трёхмерной температурно-динамической модели резонатора-термостата.

2.7. Исследование значимости распределения амплитуд колебаний в области электродов ПЭ

На рис. 2.17 (а) представлено нормированное распределение амплитуд колебаний $A_{норм}$ в плоскости XY ПЭ конструкции №2 (ТД срез, 7x10 мм, частота 10 МГц, 3-я механическая гармоника, радиус сферы 300 мм), полученное в результате расчёта на модели собственных колебаний сдвига по толщине для

пьезокварцевых пластин одно- и двухповоротных срезов, представленной в [119], на рис 2.17 (б) – трёхмерное представление.

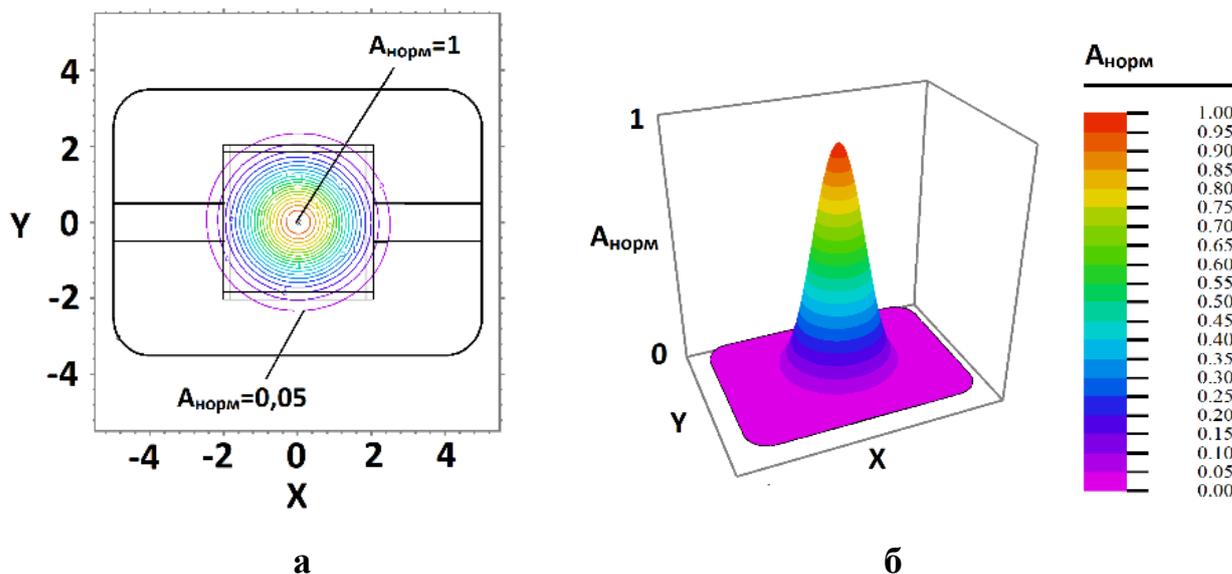


Рис. 2.17. Нормированное распределение амплитуды колебаний С-моды на электроде плосковыпуклого ПЭ ТД-среза размерами 7x10x0,54 мм (3-я механическая гармоника, радиус сферы 300 мм, частота 10 МГц) относительно максимума, равного единице: двухмерное (а) и трёхмерное (б) представление

В разрабатываемой модели данное распределение для упрощения расчётов с высокой точностью (погрешность менее 0,1%) аппроксимировано выражением

$$A_g = \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(K_{nx} \cdot x^2 + K_{ny} \cdot y^2)}{2 \cdot \tau^2}}, \quad (2.41)$$

где $K_{nx} = 0.91 \cdot 10^{-6}$, $K_{ny} = 1.03 \cdot 10^{-6}$.

Расчёт на разработанной модели показал, что для данной конструкции учёт распределения амплитуд колебаний в области электродов ПЭ увеличивает ВУЧ генератора на 0,06 с, что не является значительной величиной и может не учитываться.

2.8. Исследование значимости мощности, выделяемой в зоне колебаний ПЭ

В ПЭ кроме напылённых нагревателей присутствует ещё один источник тепла. Это мощность P_r , рассеиваемая на резонаторе возбуждающим его

автогенератором. Для данной конструкции КРТ с ПЭ сдвиговых толщинных колебаний $P_r < 0,002$ Вт при $P_{nl} = 1,5$ Вт в режиме разогрева (см. таблицу 2.2) согласно [74, с. 255].

Таблица 2.2

Максимальная допустимая мощность на резонаторе

Вид колебаний	Частотный диапазон, кГц	Мощность, мВт
Изгибные	1...100	0,1
Крутильные	30...800	1,0
Продольные	50...200	1,0
Сдвиговые (контурные)	200...1000	1,0
Сдвиговые (толщинные)	400...200000	2,0

Так как P_r на несколько порядков меньше мощности, выделяемой нагревателями на ПЭ и тепловых потоков, протекающих в нём, то возможно пренебречь влиянием мощности P_r на время установления частоты генератора [120].

2.9. Определение оптимальной мощности начального разогрева ПЭ

Для определения оптимальной мощности начального разогрева РТ и для исследования особенностей режима непосредственного подогрева ПЭ была создана тепловая модель РТ с прямым термостатированием ПЭ, с помощью которой на ЭВМ проведено исследование динамики тепловых процессов.

Метод исследования заключался в построении температурно-динамических моделей ПЭ с прямым подогревом для различных конструкций, расчётах температурного поля по этим моделям методом конечных элементов во временной области с момента включения до наступления установившегося режима и последующем анализе результатов расчёта.

Выбор двумерной системы координат обусловлена незначительными температурными градиентами по толщине пластины ПЭ, обусловленными малой

толщиной и достаточно высокой теплопроводностью для сокращения объёма вычислений, то есть в моделях отсутствует координата Z по толщине ПЭ.

Исследование динамики тепловых процессов в кварцевом ПЭ с прямым термостатированием в режиме начального разогрева с целью минимизации времени достижения температуры статирования активной зоны электромеханических колебаний ПЭ проведено путём:

- анализа факторов, влияющих на время достижения температуры статирования активной зоны электромеханических колебаний ПЭ с прямым подогревом;
- построения двумерных тепловых моделей ПЭ разных конструкций с прямым подогревом, учитывающих значимые факторы,
- проведения расчётов динамики температурного поля на полученных моделях с момента включения тока разогрева до достижения температуры статирования, снижения неравномерности температурного поля в активной зоне ПЭ и определения времени достижения температуры статирования в активной зоне электромеханических колебаний ПЭ с заданной точностью для каждого из типов ПЭ при различных значениях мощности разогрева.
- анализа расчётных данных и выработка рекомендаций по сокращению времени разогрева для конструкторов ТСКГ.

2.9.1. Определение факторов, влияющих на время достижения температуры статирования в активной зоне колебаний ПЭ с прямым подогревом для прецизионных ТСКГ

Время, необходимое для разогрева кварцевой пластины от температуры окружающей среды до температуры статирования, определяется мощностью разогрева, выделяемой напылёнными на неё нагревателями, теплоёмкостью (то есть объёмом), геометрическими размерами пластины, и ограничивается удельной теплопроводностью кварца. Чем меньше объём кварцевого ПЭ, тем быстрее он разогревается, однако уменьшение объёма без ухудшения стабильности частоты и добротности резонатора, а значит и уровня плотности

спектральной мощности шумов прецизионного ТСКГ невозможно. Геометрические размеры ПЭ ТСКГ, имеющих различные значения таких характеристик, как номинальная частота, долговременная и кратковременная нестабильность частоты и др., существенно отличаются, поэтому из-за различия в теплоёмкости нужно говорить о снижении времени разогрева ПЭ для каждого из типов ТСКГ.

На практике в современных прецизионных ТСКГ, имеющих прямой подогрев ПЭ с выходной частотой 10 МГц наиболее часто используются прямоугольные длиной 10 мм и шириной 7 мм и круглые ПЭ диаметром 8-10 мм, плосковыпуклого профиля с радиусом кривизны сферы, равным 300 мм, возбуждаемые на 3-й механической гармонике и изображённые на рис. 2.18.

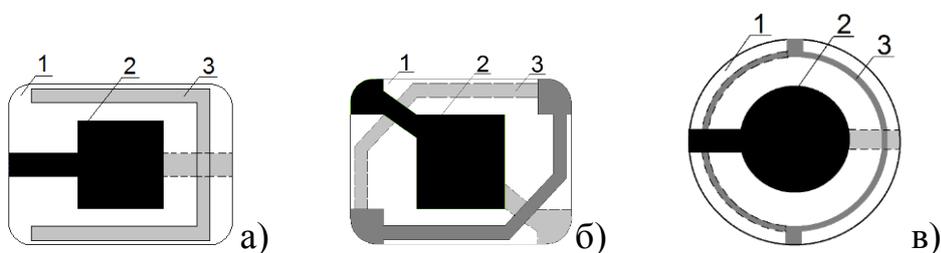


Рис. 2.18. Конструкции пьезоэлементов с напылёнными нагревателями: №1 – прямоугольный ПЭ 7x10 мм с П-образным односторонним нагревателем (а), №2 – прямоугольный ПЭ 7x10 мм с замкнутым двусторонним нагревателем (б), №3 – круглый ПЭ диаметром 10 мм с замкнутым двусторонним нагревателем (в). 1 – пластина ПЭ, 2 – электроды, 3 – нагреватели.

Непосредственное (прямое) термостатирование ПЭ осуществляется поддержанием температуры с помощью напылённого на поверхность пластины ПЭ металлического нагревателя, через который протекает электрический ток. Нагреватель в силу особенностей условий возбуждения электромеханических колебаний выполнен в виде тонкой полосы, расположенной у края кварцевой пластинки на максимальном удалении от активной зоны колебаний. ПЭ при помощи теплоизолирующих держателей крепится внутри вакуумированного корпуса резонатора-термостата.

Скорость нагрева пластины кварцевого ПЭ также зависит от потерь тепловой энергии через держатели ПЭ, от мест их крепления, от теплового излучения с поверхности пластины и от теплообмена через тепловую проводимость остаточного газа в вакуумированном корпусе резонатора, поэтому данные факторы также должны быть учтены.

2.9.2. Построение тепловых моделей пьезоэлементов

Для трёх конструкций ПЭ №1, №2, №3, изображённых на рис. 1(а), 1(б), 1(в) соответственно, построим двухмерную тепловую модель, учитывающую все описанные выше влияющие факторы.

Принимая толщину пластины (по оси y) малой по сравнению с длиной и шириной (по осям x, z) и считая температурную неоднородность по толщине незначительной, уравнение распространения тепла (дифференциальное уравнение теплообмена) в каждой точке кварцевой пластины ПЭ описывается следующим выражением [121]

$$\operatorname{div}(q) - 2Q_{iz} - 2Q_{og} + Q_n = c\rho \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (2.42)$$

где q – плотность теплового потока, описываемая вектором:

$$[(\lambda_1 + \lambda_e m)dT/dx; (\lambda_3 + \lambda_e m)dT/dz], \quad (2.43)$$

λ_1 и λ_3 – удельная теплопроводность кварца по осям x и z , λ_e – удельная теплопроводность электрода, m – коэффициент, равный 1 в точках поверхности где расположен электрод или токоподвод и равный 0 там где поверхность кварцевой пластины свободна, T – температура в рассчитываемой точке, c – удельная теплоёмкость кварца, ρ – плотность кварца $2Q_{iz}$ – потери на тепловое переизлучение между двумя сторонами поверхности пластины и внутренней поверхностью корпуса, Q_{og} – потери через тепловую проводимость остаточного газа в вакууме, Q_n – количество теплоты, выделяемой на нагревателе.

Тепловой поток, переизлучаемый между ПЭ и стенками корпуса РТ согласно [105, с. 179] определяется выражением для лучистого теплообмена между телами с параллельными серыми плоскими поверхностями 1 и 2

площадью излучения S_1 и S_2 со степенью черноты ε_1 и ε_2 и температурой T_1 и T_2 соответственно ($T_1 > T_2$), выведенные на основании закона Стефана-Больцмана:

$$Q_{iz} = \varepsilon_{\Pi} \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.44)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{S_1}{S_2}(1/\varepsilon_2 - 1)}. \quad (2.45)$$

– приведённая степень черноты пьезоэлемента и стенок корпуса, C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, ε_1 и ε_2 – степень черноты, S_1 , S_2 – площади поверхностей, T_1 и T_2 – температуры ПЭ и стенок корпуса соответственно. Излучением с торцевых сторон ПЭ ввиду его малой толщины можно пренебречь.

Количество теплоты, выделяемое на нагревателях:

$$Q_n = P \cdot t, \quad (2.46)$$

где P – мощность разогрева, t – время разогрева.

Выражения (2.42) и (2.43) с учётом (2.44), (2.45) и (2.46) являются двумерной математической моделью динамических тепловых процессов в ПЭ. Решение системы дифференциальных уравнений (2.42–2.46) в частных производных с граничными условиями, определяемыми в пространстве элементами конкретной конструкции позволяет рассчитать динамику тепловых процессов в ПЭ для каждой конструкции ПЭ.

Исходные данные, используемые при построении модели приведены в таблице 2.3. Эти данные определены физическими свойствами материалов и геометрией конструкции ПЭ.

Таблица 2.3

Исходные расчётные данные для ПЭ трёх конструкций

Параметр	Значение
Удельная теплоёмкость кварца, Дж/(кг·К) *	836
Удельная теплопроводность кварца по оси X при 0·°С, Вт/(м·К) *	7,21
Удельная теплопроводность кварца по оси Z при 0·°С, Вт/(м·К) *	13,6
Удельная теплопроводность серебра при 300 К, Вт/(м·К) **	429
Удельная теплопроводность золота при 300 К, Вт/(м·К) **	317

Удельная теплопроводность нихрома при 293 °С, Вт/(м·К) **	12,6
Удельная теплопроводность никеля при 300 К, Вт/(м·К) **	91,0
Удельная теплоёмкость никеля при 250 К (400 К), Дж/(кг·К) *	416 (482)
Давление остаточного газа в вакууме, мм рт. ст.	0,00001
Толщина электрода, мкм	0,4
Толщина нагревателя, мкм	0,15

Примечание: * – данные приведены из [6],

** – данные приведены из [11].

В [66] приведены результаты расчёта зоны активных колебаний С-моды плосковыпуклого (радиус сферы 300 мм) ПЭ ТД-среза размерами 7x10x0,05 мм, 3-я механическая гармоника, частота 10 МГц на основе модели собственных колебаний сдвига по толщине в кварцевом пьезоэлементе и в графическом виде представлены на рис.2.17 (а).

Рис. 2.17 иллюстрирует, что зона активных колебаний С-моды сосредоточена в центре ПЭ внутри эллипса близкого к кругу диаметром 4,4 мм. В этой зоне, ограниченной линией «а» сосредоточены колебания с амплитудой не менее 5% от максимума, находящегося в геометрическом центре ПЭ. Если расположить электроды резонатора так, чтобы они совпадали с этой областью, то расчёт ВУЧ КГ при включении сведётся к определению момента, когда отклонение интегральной температуры в активной зоне ПЭ, то есть на электродах, от температуры статирования не будет превышать величину 4,65 °С (см. рис. 2.12). Для этого необходимо рассчитать температурное поле в ПЭ с момента включения КГ до наступления установившегося режима. Интегральное (среднее) значение температуры на электродах вычисляется по формуле

$$T_{int}(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{1}{S} \iint_D T(x, z) dx dz, \quad (2.47)$$

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

Динамическое распределение температуры в ПЭ также определяется формой, расположением и тепловой проводимостью нагревателей, напылённых

на его поверхность, мощностью, выделяемой ими, а также тепловой проводимостью держателей ПЭ и местами их крепления.

Для трёх типовых конструкций ПЭ, изображённых на рис. 1, построены двумерные тепловые модели, позволяющие рассчитать динамическое температурное поле ПЭ с момента включения тока подогрева, до момента достижения температуры статирования.

2.9.3. Исследование конструкции №1 с П-образным нагревателем

Время разогрева ПЭ до температуры статирования максимально при минимальной рабочей температуре окружающей среды, так как требуется большее количество тепла для прогрева ПЭ, чем при более высоких рабочих температурах. Поэтому расчёты времени разогрева необходимо проводить при этой температуре. Расчёты производились с учётом топологии и физических свойств элементов конструкции методом конечных элементов на ЭВМ с шагом по времени не более 0,5 мс. На рис. 2.19 изображено распределение температурного поля в виде изотерм в ПЭ конструкции №1 в установившемся режиме при минимальной рабочей температуре окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре статирования $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разными значениями тепловой проводимости держателей ПЭ: 0,2 мВт/К (а), 0,8 мВт/К (б). 2 держателя одной стороной крепятся к ПЭ, а другой стороной к корпусу резонатора, температура которого равна температуре окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловая проводимость держателей 0,2 мВт/К (см. рис. 4(а)) значительно ниже, чем 0,8 мВт/К (см. рис. 2.19 (б)), что уменьшает неравномерности температуры в области электродов ПЭ с $7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение изотерм иллюстрирует, что, поскольку П-образный нагреватель не закрывает область вокруг электродов, с открытой стороны она активно охлаждается через держатель ПЭ. Следовательно, для более равномерного распределения температуры область электродов должна быть окружена замкнутым контуром нагревателя.

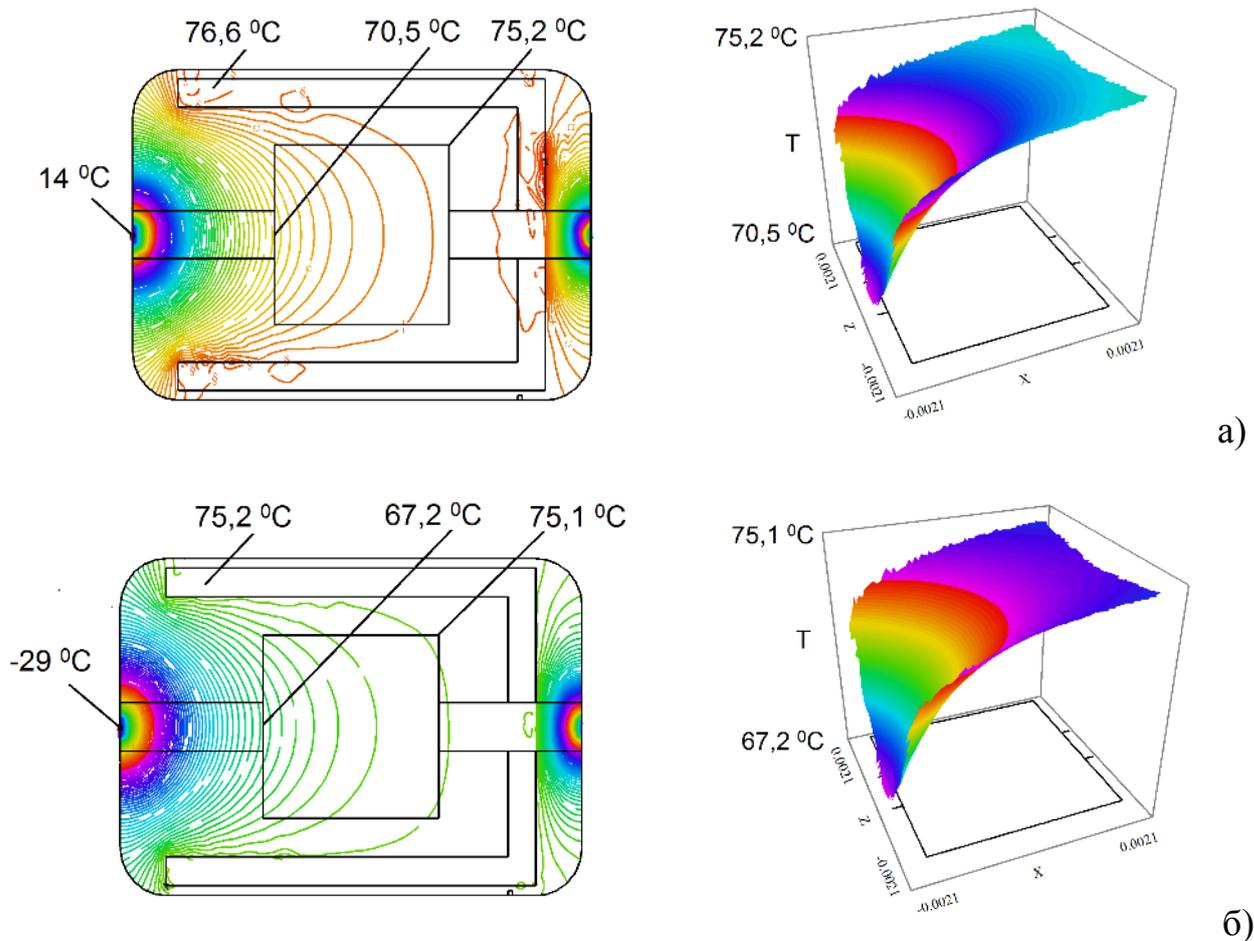


Рис. 2.19. Графическое распределение температуры в ПЭ конструкции №1 в установившемся режиме при температуре окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре статирования $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разными значениями тепловой проводимости держателей ПЭ: а) $0,2\text{ мВт/К}$, б) $0,8\text{ мВт/К}$. Справа трёхмерное представление температурного поля в области электродов.

На рис. 2.20 представлено изменение температуры в ПЭ конструкции №1 при разогреве от температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в различных точках ПЭ.

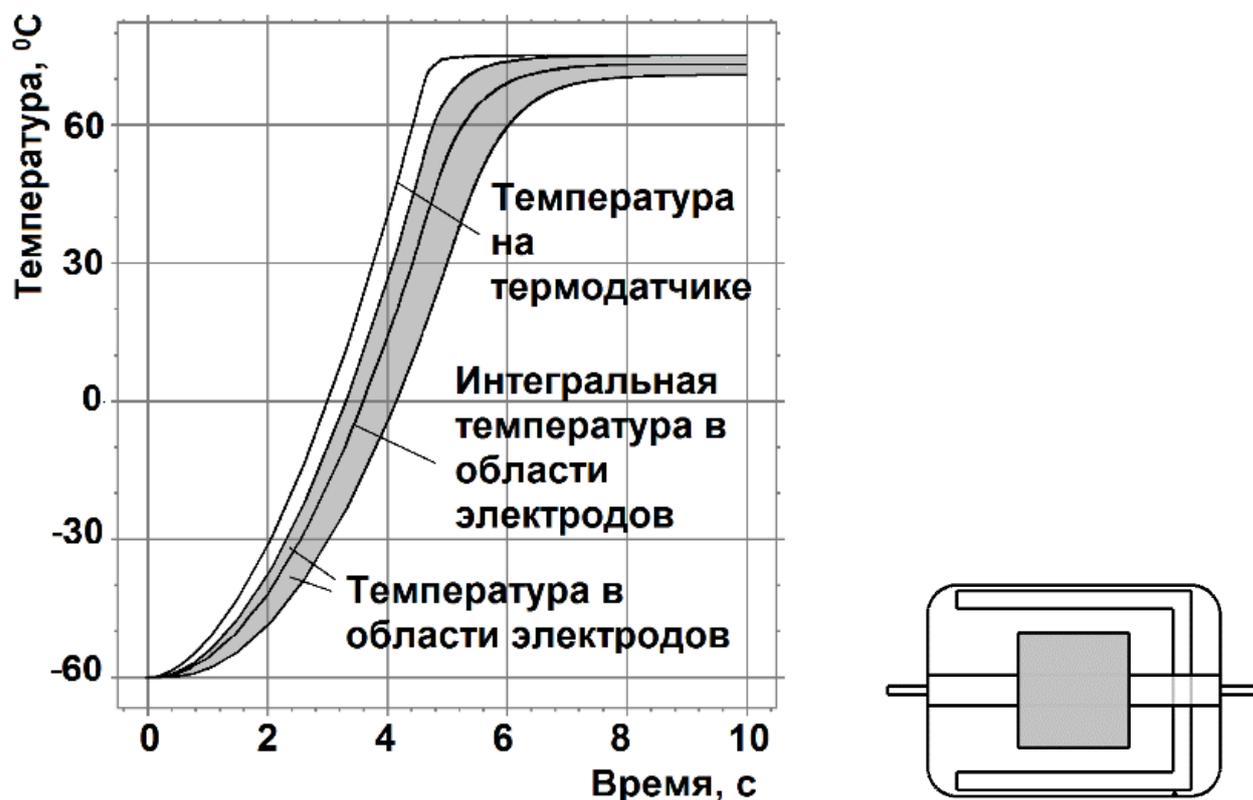


Рис. 2.20. График изменения температуры в ПЭ конструкции №1 при разогреве от температуры -60°C до 75°C в области электродов ПЭ (тёмный цвет), на термодатчике и интегральной температуры электродов.

Расчёты показывают, что увеличение тепловой проводимости держателей в конструкции с П-образным нагревателем увеличивает время разогрева области электродов ПЭ. Температура в области электрода со стороны, не закрытой нагревателем, гораздо ниже как во время разогрева, так и в установившемся режиме, и увеличивается медленнее, чем в остальных точках электрода, что увеличивает время готовности. Это говорит о том, что данная конструкция с точки зрения уменьшения времени разогрева активной зоны колебаний уступает конструкциям с геометрически замкнутым контуром нагревателя, поэтому дальнейшие исследования необходимо проводить с конструкциями ПЭ №2 и №3.

Расчёты на данных моделях позволяют определить оптимальную мощность разогрева, необходимую для достижения интегральной температуры области электродов с точностью $4,65^{\circ}\text{C}$ от установившегося значения.

Увеличение мощности разогрева, выделяемой напылёнными нагревателями, уменьшает время разогрева ПЭ, но существует предел увеличения мощности, когда удельная теплопроводность кварца ограничивает распространение тепла в объёме ПЭ и не позволяет существенно уменьшить время достижения установившегося значения интегральной температуры на электродах. Расчёты показали, что для конструкций №2 и №3 увеличение мощности разогрева до 1,5...2 Вт эффективно снижает время достижения температуры статирования ПЭ, а дальнейшее повышение практически не приводит к уменьшению времени разогрева (см. рис. 2.21), равного примерно 6 с. Эти значения приняты за оптимальные и значение 1,5 Вт использовано для дальнейших расчётов.

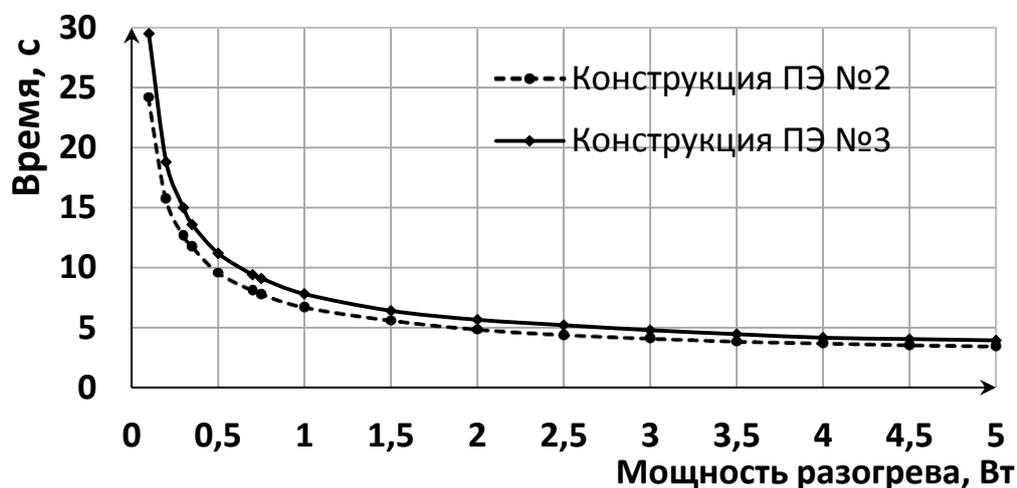


Рис. 2.21. График зависимости времени достижения установившегося значения интегральной температуры на электродах с точностью $4,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ от мощности разогрева ПЭ.

2.9.4. Исследование конструкции №2 с замкнутым контуром нагревателя

ПЭ конструкции №2 с замкнутым контуром нагревателя крепится к корпусу резонатора, имеющего температуру окружающей среды, при помощи четырёх держателей.

На рис. 2.22 показано распределение температуры в ПЭ конструкции №2 через 5,6 с после включения мощности разогрева 1,5 Вт при температуре

окружающей среды -60°C и температуре статирования 75°C в момент времени, когда отклонение интегральной температуры электродов от установившегося значения становится меньше $4,65^{\circ}\text{C}$.

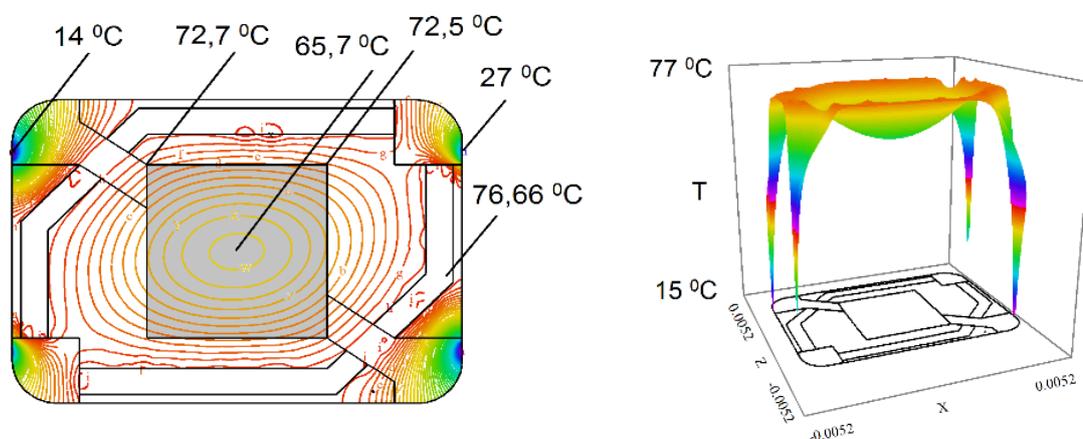


Рис. 2.22. Распределение температуры в ПЭ конструкции №2 через 5,6 с после включения подогрева (справа трёхмерное представление).

Данная конструкция согласно расчётным данным обеспечивает равномерный прогрев ПЭ с неравномерностью температуры в зоне электродов не более $0,13^{\circ}\text{C}$ в установившемся режиме. Низкая тепловая проводимость держателей обеспечивает незначительное охлаждение ПЭ в местах их крепления. Сравнивая прямоугольную форму электродов с кольцевидными изотермами и практически совпадающими с ними изолиниями амплитуд колебаний С-моды в активной зоне (см. рис. 2.23), для уменьшения неравномерности температуры в области электродов можно предложить изменение их формы на круглую с диаметром $3,7\text{ мм}$, поскольку углы электродов захватывают зону с более высокими температурами и низкими амплитудами колебаний (см. рис. 2.23 и рис. 2.17). На рис. 2.23 изображено трёхмерное распределение температуры в области электродов: оси X и Z в метрах, а вертикальная ось – температура в градусах Цельсия.

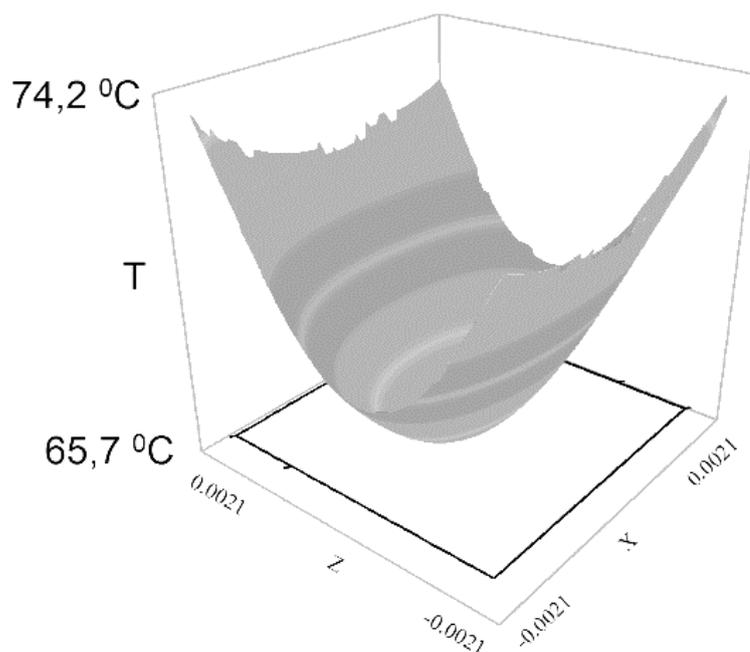


Рис. 2.23. Распределение температур на квадратном электроде ПЭ конструкции №2 через 5,6 с после включения.

На рис. 2.24 показан график изменения температуры в различных точках ПЭ в режиме разогрева при температуре окружающей среды -60°C .

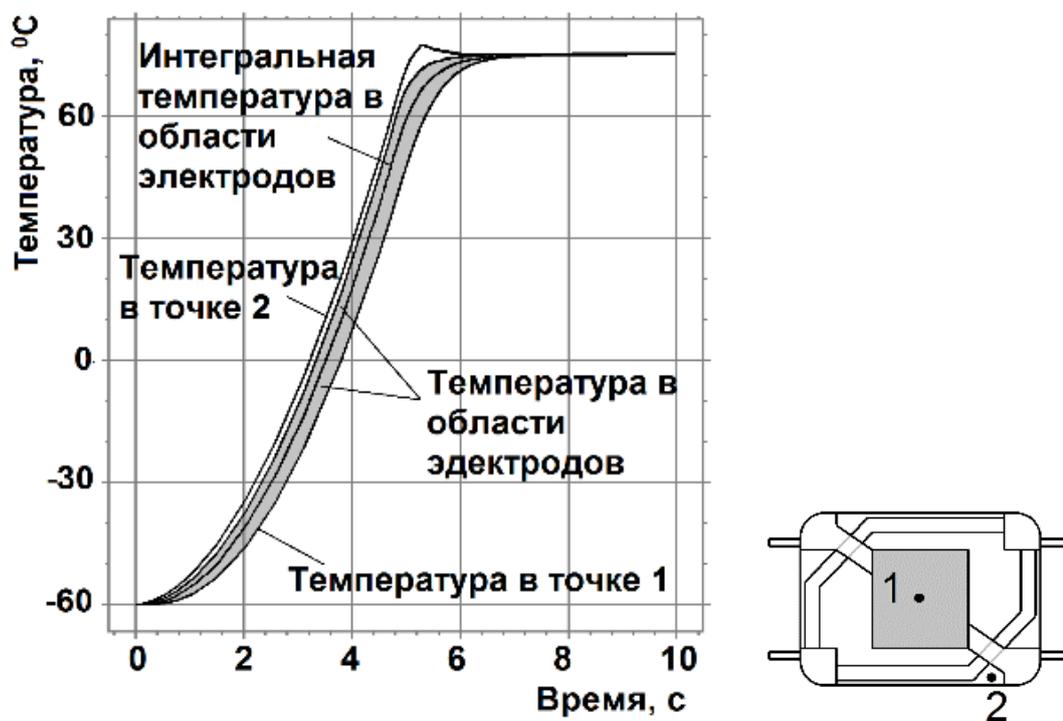


Рис. 24. Изменение температуры в области электродов (выделена тёмным), в центре электрода (точка 1), в месте крепления термодатчика (точка 2)

и интегральной температуры на электродах T_{int} конструкции №2
с момента включения нагревателей мощностью 1,5 Вт
до наступления установившегося режима

На рис. 2.25 показано динамическое отклонение интегральной температуры электродов T_{int} от установившегося значения T_z в режиме разогрева. Из графика видно, что значение $T_z - T_{int}$ не превышает величины $4,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, начиная с $5,6\text{ с}$.

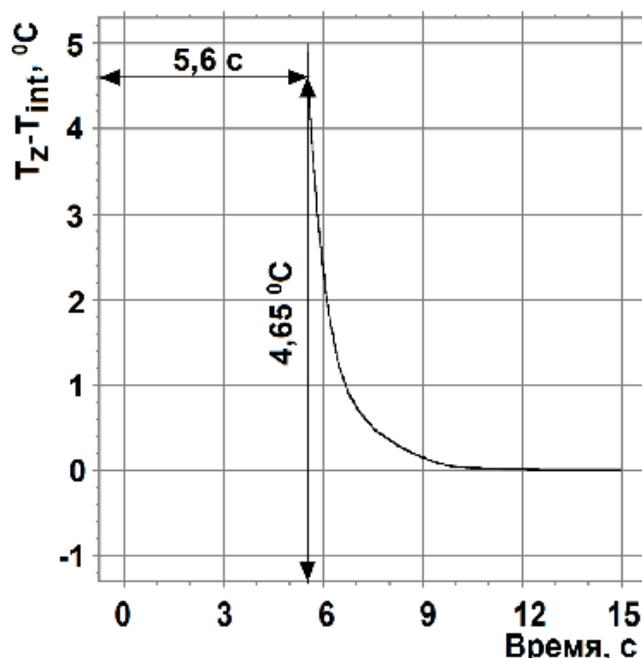


Рис. 2.25. Отклонение интегральной температуры электродов T_{int} от установившегося значения T_z в режиме разогрева (б).

2.9.5. Исследование конструкции №3 с замкнутым контуром нагревателя

ПЭ конструкции №3 с замкнутым контуром нагревателя также крепится к корпусу резонатора, имеющего температуру окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, с помощью четырёх держателей. На рис. 2.26 изображено распределение температуры в ПЭ конструкции №3 через 10 с после включения нагревателя мощностью 1,5 Вт. Хорошо видно, что пластина ПЭ прогрета равномерно, за

исключением областей, примыкающих к местам крепления держателей. На этот момент времени температура в зоне электродов достигла установившегося значения, и неравномерность температуры в этой зоне не превышает $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

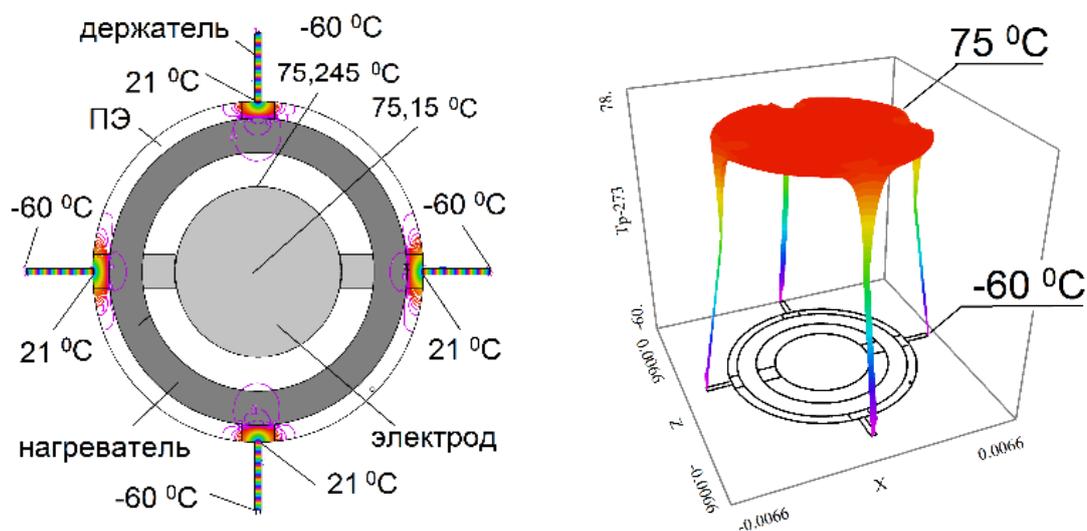


Рис. 2.26. Распределение температуры в ПЭ конструкции №3 в установившемся режиме через 10 с после включения нагревателя мощностью 1,5 Вт (справа трёхмерное представление).

На рис. 2.27 показано изменение температуры в различных точках ПЭ в режиме разогрева.

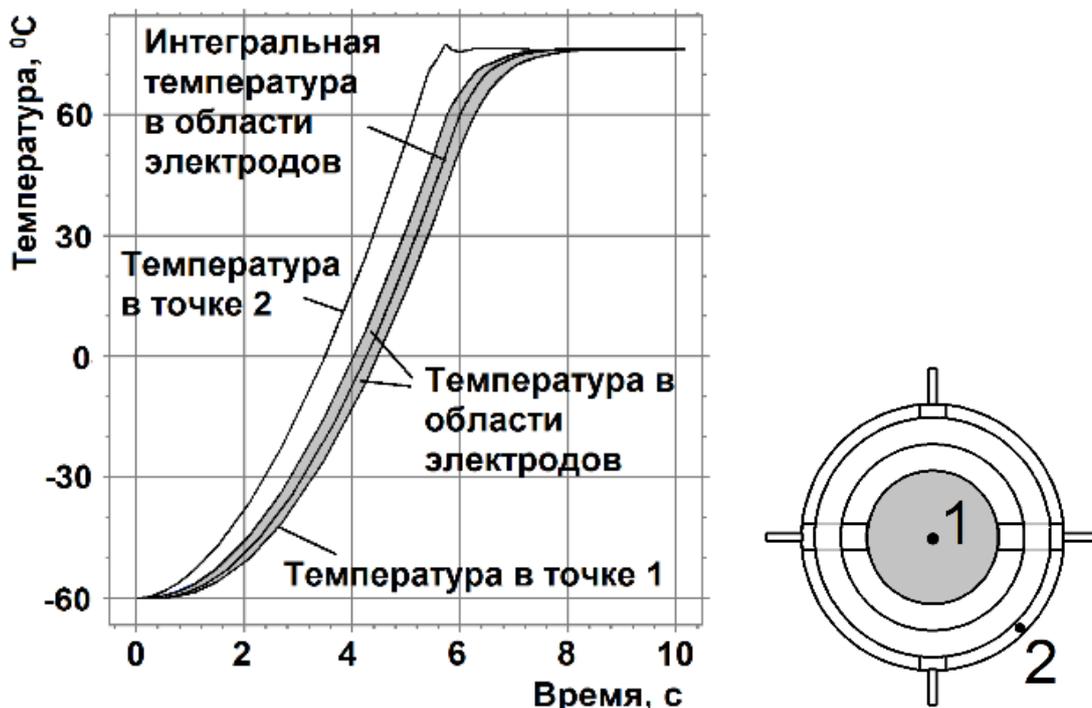


Рис.2.27. Изменение температуры в центре ПЭ (точка 1), в месте крепления термодатчика (точка 2) и интегральной температуры на электродах T_{el} конструкции №3 с момента включения нагревателя мощностью 1,5 Вт до наступления установившегося режима (а),

На рис. 2.28 показано динамическое отклонение интегральной температуры электродов T_{el} от установившегося значения T_z в режиме разогрева. Из графика видно, что значение $(T_z - T_{int})$ не превышает величины $4,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, начиная с $6,4\text{ с}$.

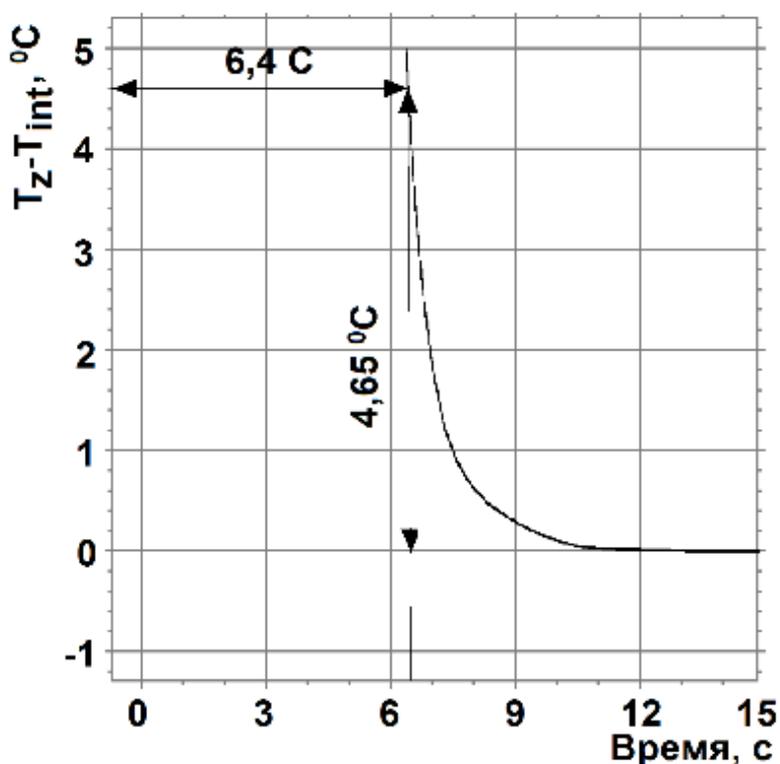


Рис. 2.28. Отклонение интегральной температуры электродов T_{int} от установившегося значения T_z в режиме разогрева (б).

На рис. 2.29 показано распределение температуры в области электродов ПЭ конструкции №3 через $6,4\text{ с}$ после включения нагревателя мощностью 1,5 Вт. Кольцевая линия периметра электродов совпадает с одной из кольцевых концентрических изотерм. Это говорит о равномерном пространственном прогреве области электродов.

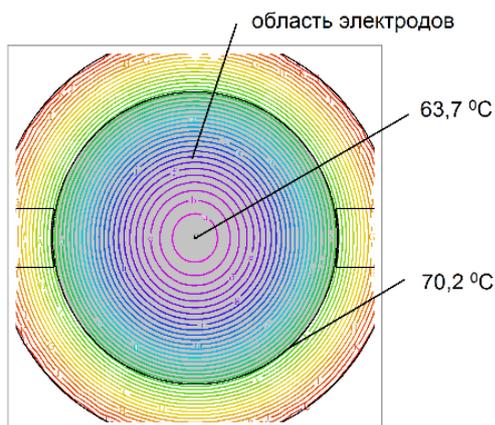


Рис. 2.29. Распределение температуры в области электродов ПЭ конструкции №3 через 6,4 с после включения нагревателя мощностью 1,5 Вт.

Рисунок 2.30 иллюстрирует распределение температуры в области электродов ПЭ через 6,4 с после включения по линиям 1-2 от одного держателя до другого.

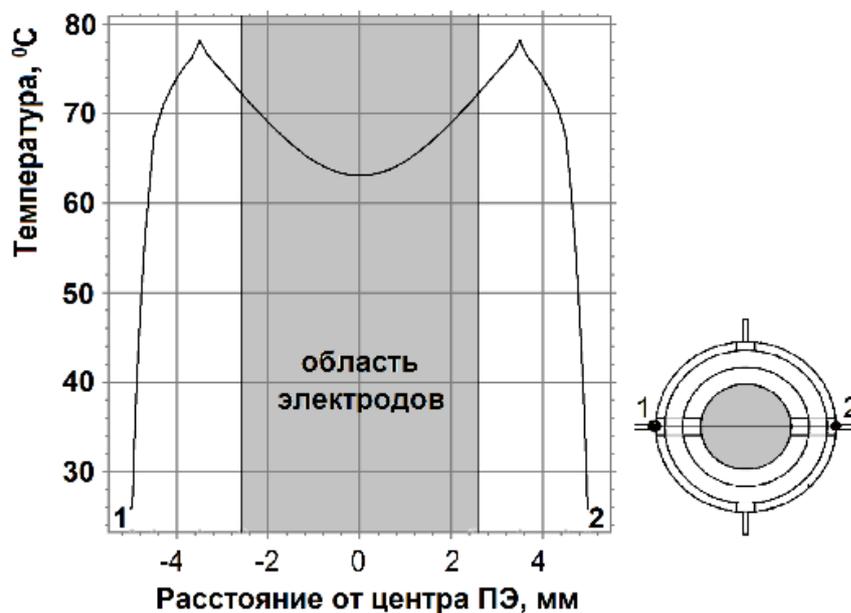


Рис. 2.30. Распределение температуры в ПЭ конструкции №3 через 6.4 с после включения нагревателя по линиям 1-2.

Область электродов на графике выделена тёмным. Рисунок 2.31 иллюстрирует распределение температуры в области электродов ПЭ через 6,4 с после включения по линиям 1-2 в сечении между держателями.

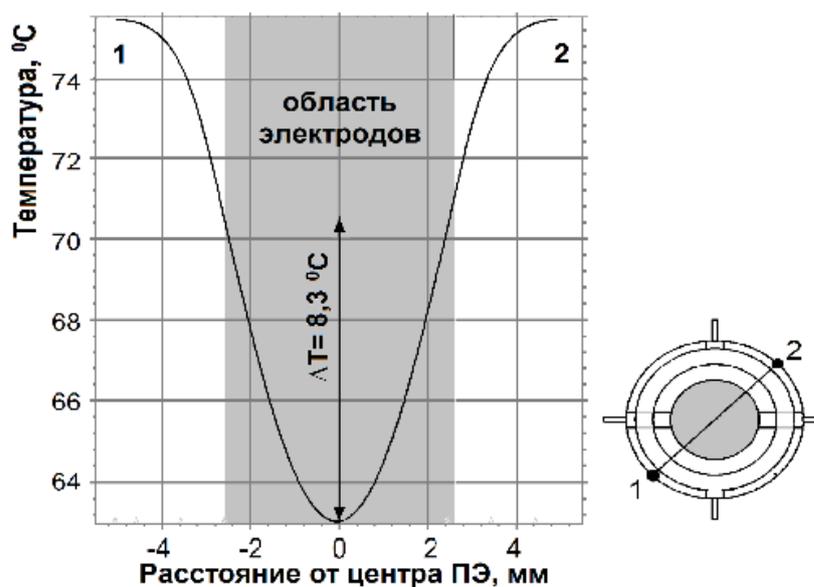


Рис. 2.31. Распределение температуры в ПЭ конструкции №3 через 6.4 с после включения нагревателя по линиям 1-2.

Максимальная разница температур в области электродов ΔT составляет 8,3 $^{\circ}\text{C}$, которая уменьшается с наступлением установившегося режима до 0,05 $^{\circ}\text{C}$. Данные графики показывают, что в области крепления жержателе температурные градиенты значительно увеличиваются.

Изменение частоты термочувствительной В-моды, использованной для измерения интегральной температуры на электродах при включении ТСКГ с ПЭ конструкции №2, разогреваемого мощностью 1,5 Вт при температуре окружающей среды 25 $^{\circ}\text{C}$ показало, что температура статирования достигается примерно через 3,5 с (см. рис 2.32). Расчётное время разогрева области электродов ПЭ такой конструкции в подобных условиях составило 3,4 с, что говорит о хорошем совпадении эксперимента с расчётными данными.

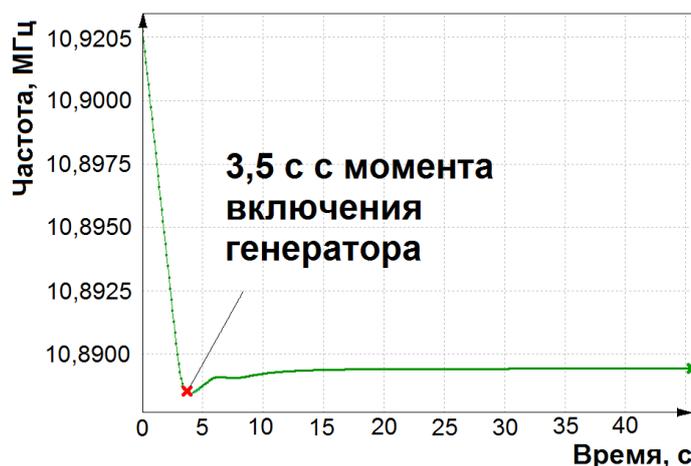


Рис. 2.32. Изменение частоты В-моды при включении ТСКГ с ПЭ конструкции №2, разогреваемого мощностью 1,5 Вт при температуре окружающей среды 25 °С.

Построение данных моделей ПЭ с прямым термостатированием и результаты их исследования опубликованы в [122].

Расчёты динамического температурного поля конструкций ПЭ с прямым подогревом, наиболее часто применяемых в прецизионных КГ, позволяют сделать следующие выводы:

- Оптимальная мощность, необходимая для максимально быстрого разогрева области электродов типовых ПЭ конструкции №2 (прямоугольная пластина размерами 7x10x0,54 мм с напылённым замкнутым нагревателем) и конструкции №3 (круглая пластина диаметром 10 мм и толщиной 0,54 мм с напылённым кольцеобразным нагревателем), примерно равна 1,5 Вт.
- Прямой подогрев теоретически без учёта инерционности системы терморегулирования и влияния температурно-механических напряжений и температурно-динамического эффекта частоты позволяет снизить время готовности прецизионных ТСКГ с выходной частотой 10 МГц с точностью $1 \cdot 10^{-7}$ до 6 с в широком диапазоне рабочих температур (от -60 °С до 75 °С).
- На основе результатов моделирования, представленных в данной работе для минимизации неравномерности температурного поля в активной зоне пьезоэлемента и, соответственно, уменьшении ВУЧ конструкторам прецизионных ТСКГ можно предложить следующие рекомендации:

- форма электродов должна максимально совпадать с эллиптической формой активной зоны колебаний, близкой к окружности;
- нагреватель должен иметь геометрически замкнутый контур и по возможности близко располагаться к окружности, концентрической с окружностью периметра электродов;
- держатели ПЭ должны иметь минимальную тепловую проводимость, но обеспечивать теплоотдачу, достаточную для работы системы терморегулирования;

Выводы

В ходе работы на основании анализа объекта и предмета исследования, известных способов стабилизации частоты и схемно-конструктивных решений и существующих методов расчёта и теплового моделирования резонаторов-термостатов разработана пространственная температурно-динамическая модель резонатора с распределённым подогревом пьезоэлемента, включающая электрическую схему терморегуляции, учитывающая комплекс влияющих конструктивных и физических факторов и позволяющая определить время установления частоты генератора для конструкции РТ с распределённым нагревателем ПЭ.

Определена оптимальная мощность разогрева ПЭ напылённым на него нагревателем, проведены исследования и предложены рекомендации по форме напылённых на ПЭ нагревателей

Обоснован выбор конструктивно-технологических особенностей РТ, способных обеспечить уменьшение времени установления частоты прецизионных ТСКГ.

Показано, что дальнейшее снижение времени установления частоты, приближающееся к физическому пределу, невозможно без исследования динамики тепловых процессов в резонаторе-термостате с распределённым нагревателем в режиме разогрева.

Проведён анализ конструктивных и физических факторов, влияющих на динамику температурного поля в активной зоне колебаний ПЭ прецизионных термостатированных кварцевых генераторов в режиме начального разогрева, которая определяет время установления частоты прецизионных ТСКГ.

Определены факторы, влияющие на время установления частоты ТСКГ, которые должны быть математически описаны в разрабатываемой модели и определены как её входные параметры:

- Температура окружающей среды;
 - Теплопередача через остаточные газы в вакууме;
 - Геометрия элементов конструкции и топология их взаимного расположения;
 - Тепловая мощность, выделяемая в нагревателях;
 - Управляющая характеристика терморегулятора;
 - Лучистый теплообмен между элементами конструкции;
 - Плотность и нестационарные теплопроводность и теплоёмкость материалов элементов конструкции;
 - Анизотропия физических свойств материала ПЭ (кварца);
 - Температурно-частотная характеристика ПЭ;
- Факторы, влиянием которых можно пренебречь:
- Мощность, выделяемая в зоне колебаний ПЭ
 - Распределение амплитуд колебаний на электродах ПЭ
- Фактор, который невозможно учесть в тепловой модели:
- Динамические температурно-механические напряжения в ПЭ.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РТ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ ПЭ

3.1. Результаты расчётов температуры в различных точках РТ в режиме разогрева

На разработанной трёхмерной тепловой модели РТ с распределённым нагревателем ПЭ путём расчёта на ЭВМ методом конечных элементов были проведены исследования динамики температурного поля.

На рис. 3.1. представлены результаты расчётов температуры в различных точках РТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

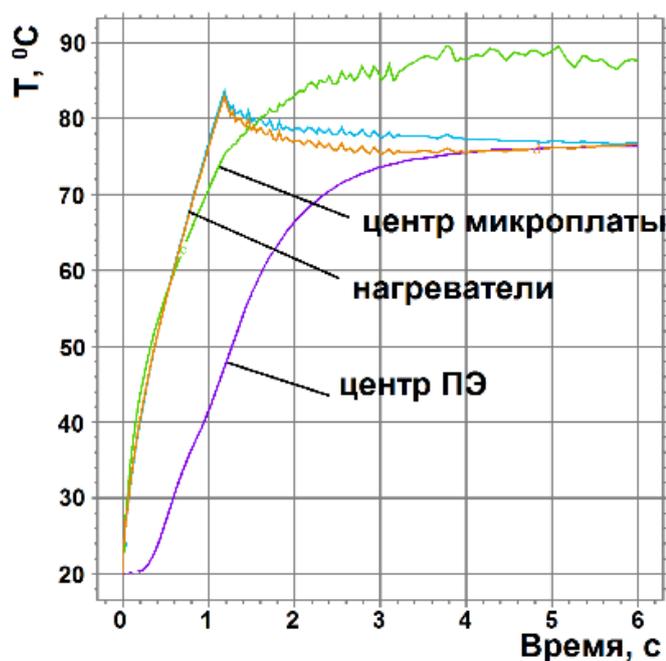


Рис. 3.1. Температуры в различных точках КРТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 3.2 представлены результаты расчётов интегральных температур элементов конструкции КРТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

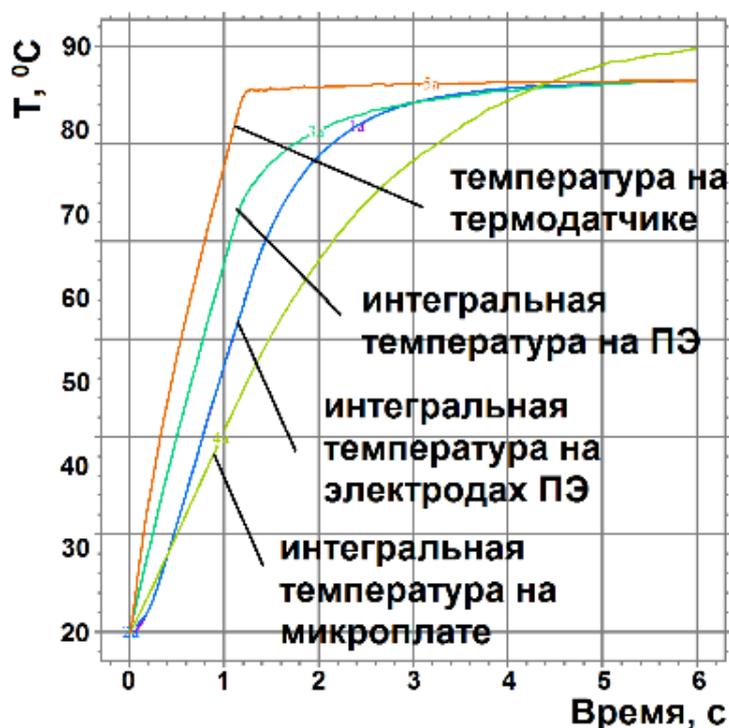


Рис. 3.2. Интегральные температуры элементов конструкции КРТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды +20 °С

Время разогрева ПЭ до температуры статирования максимально при минимальной рабочей температуре окружающей среды, так как требуется большее количество тепла для прогрева ПЭ, чем при более высоких рабочих температурах. Поэтому необходимо провести аналогичные расчёты при этой температуре. На рис. 3.3 представлены результаты расчётов температуры в различных точках РТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды – 60 °С.

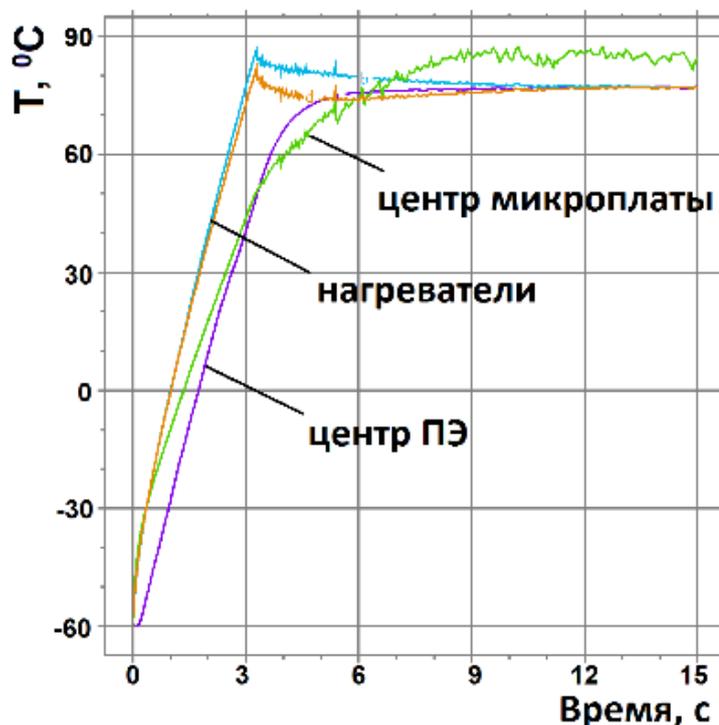


Рис. 3.3. Температуры в различных точках КРТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды -60°C

На рис. 3.4 представлены результаты расчётов интегральных температур элементов конструкции КРТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды -60°C .

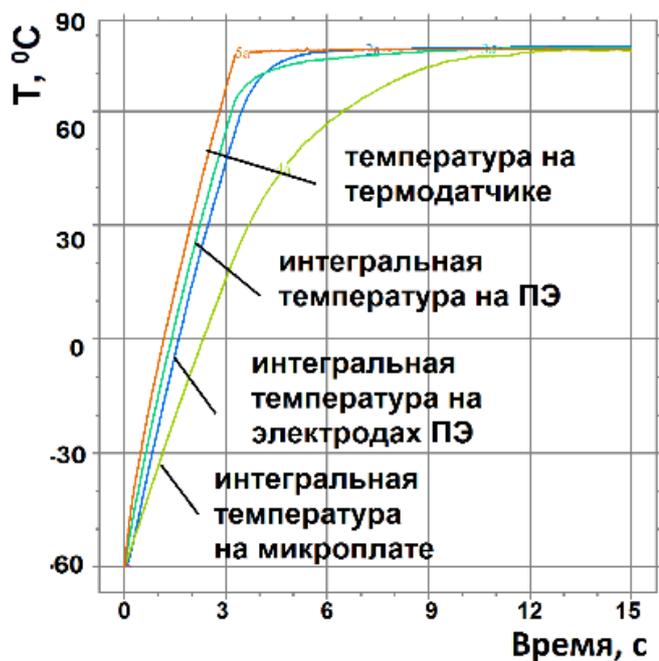


Рис. 3.4. Интегральные температуры элементов конструкции РТ в режиме разогрева при температуре окружающей среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температурная динамика в важнейших точках и элементах конструкции при начальном разогреве ТСКГ, показанная на графиках говорит о правильной работе РТ и о практической реализуемости режима его работы с точки зрения опасности термического повреждения элементов. Графики иллюстрируют, что, температура во всех элементах конструкции не превышает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данный контроль невозможен при использовании других известных способов расчёта.

3.2. Результаты расчётов мощностей, выделяемых на нагревателях РТ в режиме разогрева

На рис. 3.5 представлены результаты расчётов мощностей, выделяемых на нагревателях КРТ при разогреве при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

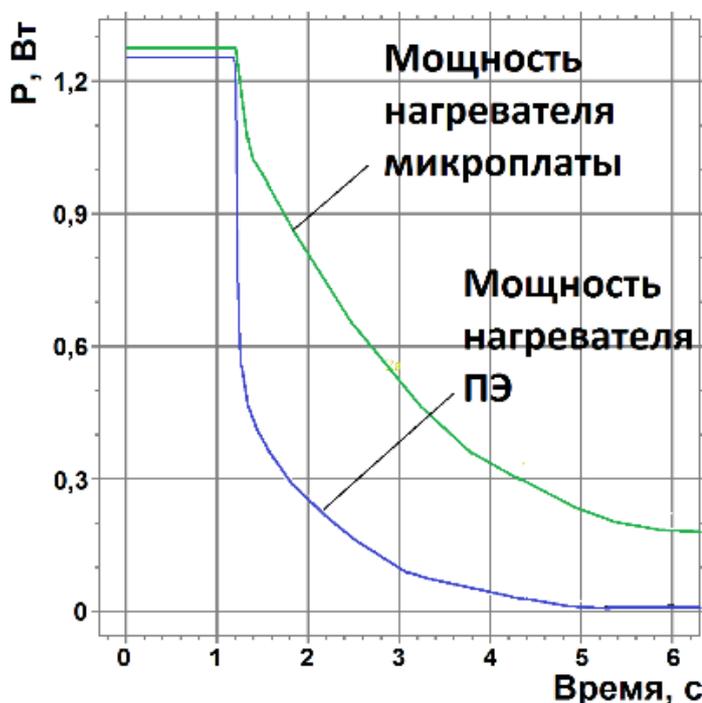


Рис. 3.5. Мощности, выделяемые на нагревателях РТ при разогреве при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3.6 представлены результаты расчётов мощностей, выделяемых на нагревателях РТ при разогреве при температуре окружающей среды -60°C .

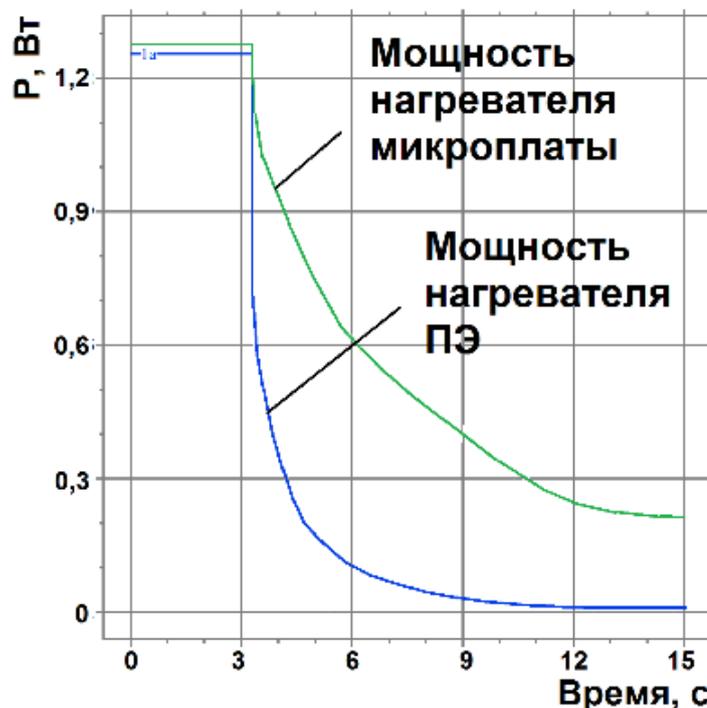


Рис. 3.6. Мощности, выделяемые на нагревателях РТ при разогреве при температуре окружающей среды -60°C .

Графики, представленные на рис. 3.5 и 3.6 иллюстрируют, что режим работы РТ соответствует требованиям для правильной работы РТ с распределённым нагревателем, представленным в [85. 86]. То есть в первые секунды после включения оба нагревателя выделяют мощность примерно по 1,3 Вт. Таким образом происходит прямой разогрев ПЭ. По мере нагрева МП и ПЭ мощность плавно сбрасывается, и в установившемся режиме подогрев осуществляется в основном нагревателем МП, Мощность, выделяемая на МП снижается примерно до 0,3 Вт, а мощность, выделяемая на ПЭ снижается до величины на два порядка меньше, то есть генератор в установившемся режиме переходит на косвенный подогрев ПЭ.

Отсутствуют значительные колебания мощности подогрева, которые могут быть незатухающими или медленно затухающими и 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 резонатора-термостата происходит в штатном режиме.

Подобные расчёты произведены во всём диапазоне рабочих температур. Результаты расчётов показали, что нагреватели работают штатно во всём диапазоне рабочих температур.

3.3. Результаты расчётов времени установления частоты

На основе расчётов изменения интегральной температуры области электродов в режиме начального разогрева определяется время установления частоты в соответствии с требованиями, предъявляемыми к прецизионным ТСКГ с максимальным отклонением от установившегося значения частоты (точностью) через 1 час после включения не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. В соответствии с формулами (2.23) и (2.25) это время соответствует времени достижения температуры статирования активной зоны электромеханических колебаний ПЭ с величиной не более $4,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для наглядности результатов расчётов временная шкала на графиках сокращена, при этом погрешность по результатам расчётов не превышает 1%.

Из графика, представленного на рис. 3.7 видно, что ВУЧ генератора при температуре окружающей среды $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. по расчётам составляет около 2,5 с.

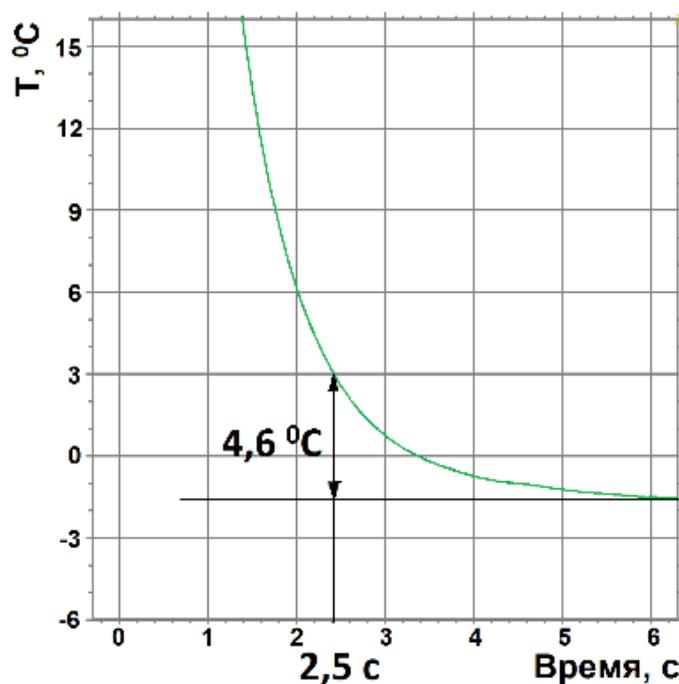


Рис. 3.7. Отклонение интегральной температуры электродов от установившегося значения в режиме начального разогрева при температуре окружающей среды $+20^{\circ}\text{C}$.

При минимальном значении диапазона рабочих температур время установления частоты максимально, поэтому расчёты необходимо проводить при температуре -60°C . На рис. 3.8 представлены результаты расчётов отклонения интегральной температуры электродов от установившегося значения в режиме начального разогрева при температуре окружающей среды -60°C .

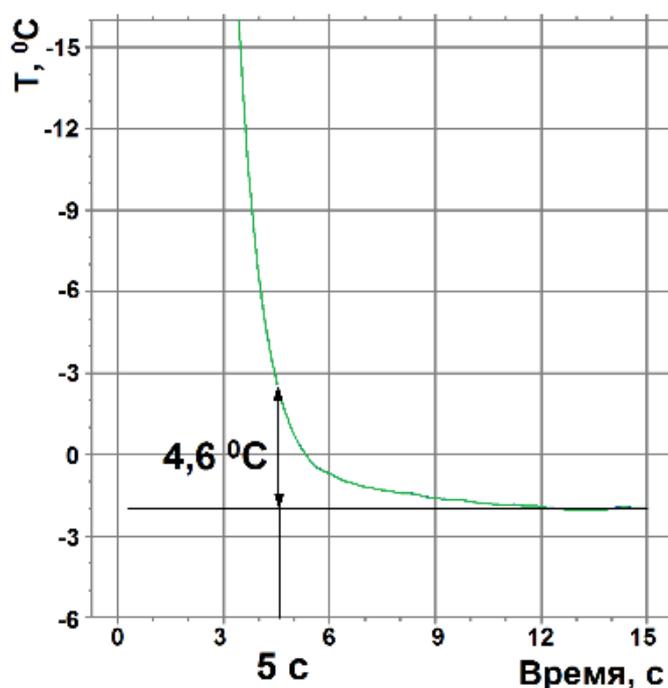


Рис. 3.8. Отклонение интегральной температуры электродов от установившегося значения в режиме начального разогрева при температуре окружающей среды $-60 ^\circ\text{C}$.

Результаты расчёта показывают, что время установления частоты генератора при этой температуре по расчётам составляет около 5 с.

Также контролировалось время установления частоты во всём диапазоне рабочих температур, и по результатам расчётов не превысило 5 с.

Выводы

Результаты расчётов на разработанной пространственной температурно-динамической модели РТ показывают, что с точки зрения динамики тепловых процессов возможно значительное сокращение времени разогрева зоны активных колебаний ПЭ, влекущее за собой снижение времени установления частоты. Однако при начальном разогреве РТ на время установления частоты оказывают влияние механические напряжения, возникающие в ПЭ во время начального разогрева, характеризующиеся такими параметрами, как силовочастотная характеристика (СЧХ) кварцевого ПЭ и его температурно-динамический коэффициент частоты (ТДКЧ) ТДКЧ ПЭ ТД-среза подробно рассмотрен в [87]. Данные эффекты обусловлены динамическими температурными градиентами в

кристаллической решётке пьезокварца, из которого изготовлен ПЭ, вызывающими нестационарные механические напряжения. Данные факторы способны увеличить время установления частоты ТСКГ при быстром начальном разогреве. Учёт их влияния требует сложных численных расчётов на модели, объединяющей температурно-динамическую модель, представленную в данной работе, модель, позволяющую рассчитать механические напряжения в ПЭ, возникающие при быстром разогреве ПЭ и элементов его крепления, и модель собственных колебаний сдвига по толщине в ПЭ ТД-среза, представленной в [66], и в рамках данной работы не реализован. Однако применение в конструкции КРТ ПЭ ТД-среза, обладающего малыми значениями силового коэффициента частоты и температурно-динамического коэффициента частоты, а также расположение точек крепления держателей ПЭ способны снизить влияние динамических механических напряжений.

Для проверки возможности уменьшения времени установления частоты необходимы экспериментальные исследования на натуральных образцах ТСКГ с конструкцией, разработанной на основе проведённых в данной работе расчётов.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТСКГ С РТ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

На основе разработанной конструкции РТ и определённых параметров настройки терморегулятора были изготовлено несколько десятков макетных образцов ТСКГ.

4.1. Изготовление резонатора термостата, разработанной конструкции

Конструкция резонатора-термостата, изображённого на рис. 4.1, имеет металлостеклянный вакуумированный корпус, состоящий из коварового основания (1) и никелевого кожуха (2).

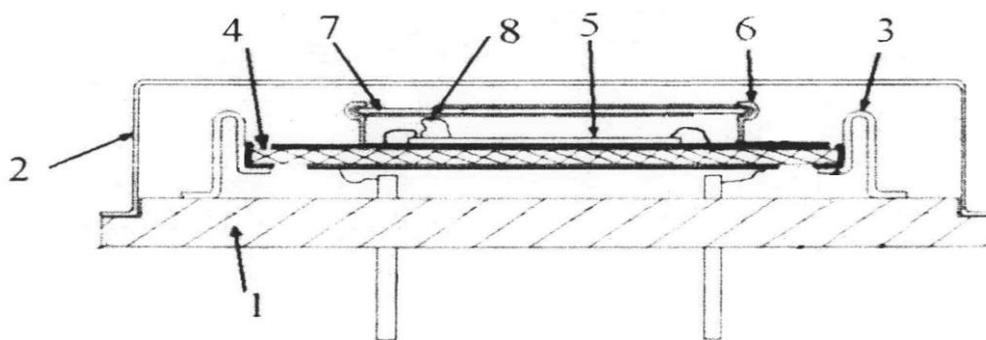


Рис. 4.1. Конструкция РТ с распределённым нагревателем

Внутри него на стойках держателей (3), приваренных к основанию точечной сваркой установлена керамическая теплопроводящая микроплата (4). На МП установлен нагревательный транзистор (5) и держатели (6) с ПЭ (7), к которому крепится датчик температуры 8. Керамическая МП в соответствии с произведёнными расчётами изготовлена из оксида алюминия марки ВК-100. Держатели МП (3) изготовлены в соответствии с [71] из нихрома, имеющего высокую механическую прочность и низкую теплопроводность, обеспечивая с одной стороны хорошую теплоизоляцию элементов термостатируемой внутренней конструкции, и с другой дающего достаточную возможность оттока избыточного тепла в окружающую среду.

Также в соответствии с моделью в конструкции применён прямоугольный кварцевый ПЭ ТД-среза, работающий на 3-й механической гармонике, на номинальную частоту 10 МГц, который имеет размеры 7x10x0,5 мм. Одна сторона ПЭ имеет сферическую поверхность радиусом 300 см, обеспечивающую концентрацию колебаний в центральной зоне ПЭ, то есть в пределах области электродов (рис. 4.2). Данный ПЭ подробно описан в [123, 85-94].

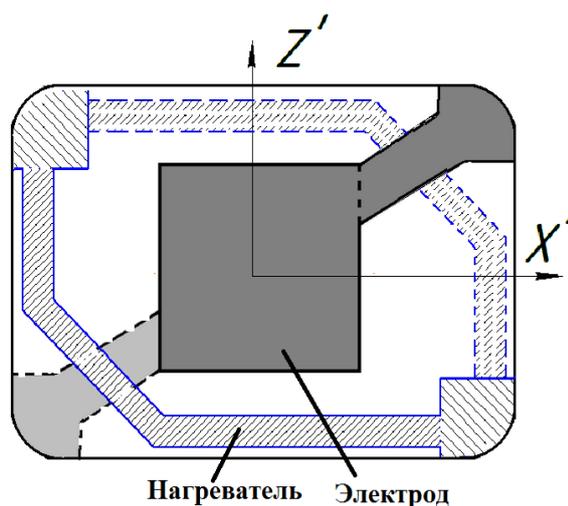


Рис. 4.2. Конструкция ПЭ с напылённым плёночным нагревателем

По периметру ПЭ также в соответствии с моделью напылён плёночный никелевый нагреватель, который имеет замкнутый контур, обеспечивающий равномерный разогрев активной зоны колебаний во время выхода генератора на режим. Данная конструкция ввиду миниатюрности не имеет внутреннего геттера, поглощающего остаточные газы во внутреннем вакуумированном объёме, и в соответствии с разработанной технологией РТ подвергался длительному отжигу при температуре 155 °С для ускоренной десорбции газов из элементов конструкции.

Изготовленные РТ устанавливались на печатный узел генератора путём приклейки дна корпуса и припайки выводов. Печатный узел после настройки и проведения начального прогона устанавливался в герметичный металлический корпус.

4.2. Исследование параметров образцов генераторов с РТ разработанной конструкции.

Экспериментальные исследования параметров макетных образцов генераторов с резонаторами-термостатами конструкции, разработанной с использованием предложенной модели показали следующие результаты [117].

На графиках, представленных на рис. 4.3 и 4.4, 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.

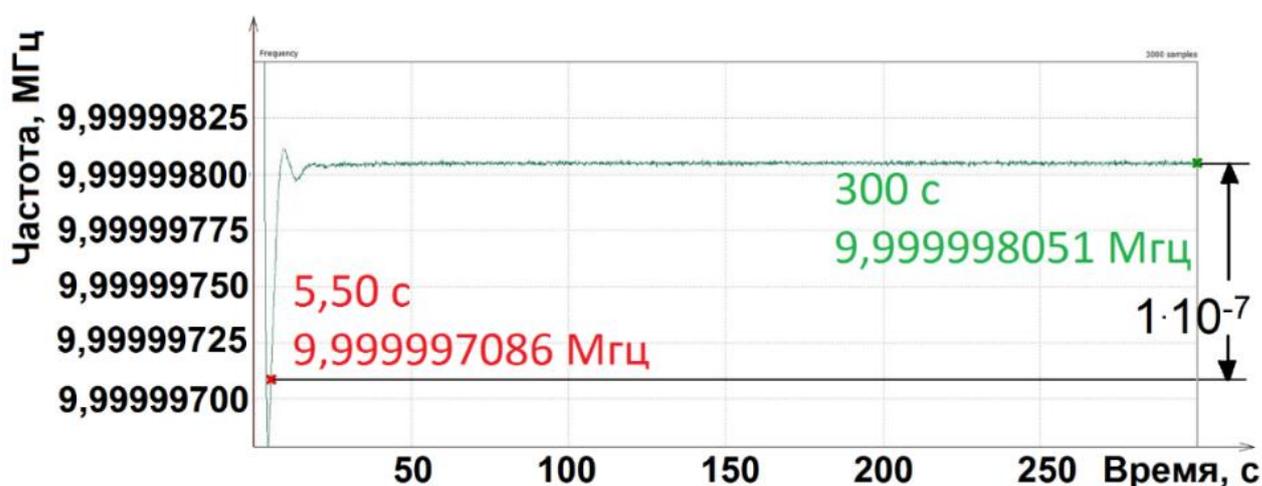


Рис. 4.3. Установление частоты кварцевого генератора после включения при температуре +20 °С. Время установления частоты– 5,5 с

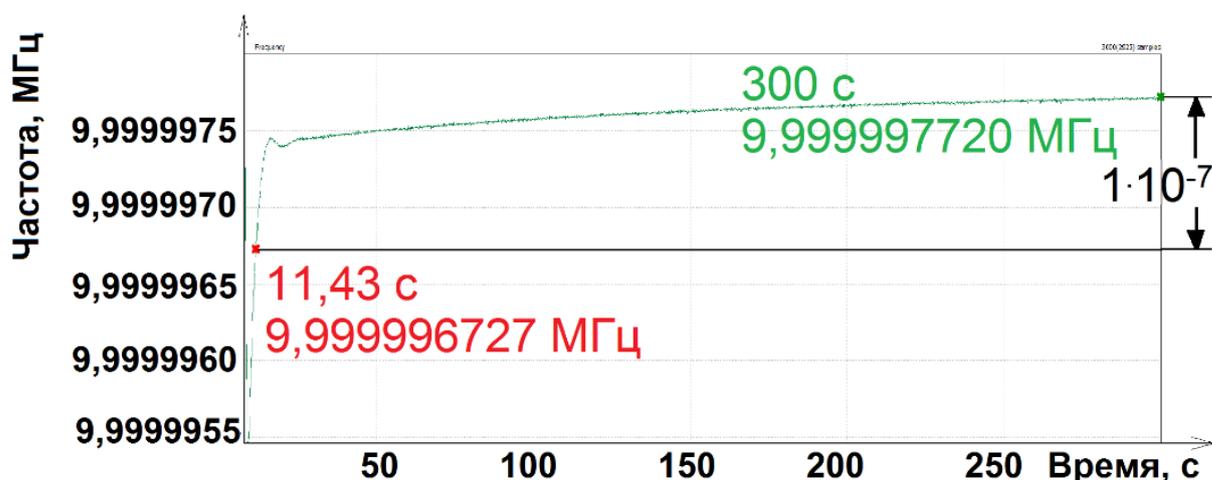


Рис. 4.4. Установление частоты кварцевого генератора после включения при температуре –60 °С. Время установления частоты –11,4 с

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.

Также проведено исследование долговременной нестабильности частоты (старения) ТСКГ с РТ разработанной конструкции, корпуса которых изготовлены с применением лазерной сварки и технологии отжига, описанной в [64. 68] и сравнение показателей старения ТСКГ с КРТ в стеклянных корпусах с газопоглотителем (геттером) и без и металлостеклянных корпусах, изготавливаемых с применением компрессионной (холодной) и резистивной сварки. Результаты опубликованы в [124]. (Долговрем нестаб)

Метод исследования заключался в том, что изготовленные РТ устанавливались в ТСКГ, конструкция которых описана в [117], и после прогрева генераторов производилось измерение частоты и фиксация результатов с помощью измерительного программно-аппаратного комплекса Pendulum CNT-91/TimeView 3.0 на протяжении определённого времени, необходимого для определения долговременной нестабильности частоты за сутки, за месяц и за полгода. В процессе исследования были произведены измерения долговременной нестабильности частоты более 50 образцов КГ с РТ в металлостеклянных корпусах 1203, изготовленных с применением лазерной сварки. Результаты измерений показали соответствие требованиям по долговременной нестабильности частоты.

В таблице 4.1 представлены значения относительного долговременного изменения частоты (старения) по результатам измерений частоты при начальном

технологическом прогоне макетных образцов ТСКГ с условными номерами 185, 170, 171, 174. Измерения проводились в течение 10 дней после прогрева генераторов в течение 4 дней. Таким образом, среднесуточное старение с 5 по 15 день прогона составило величины в пределах $\pm 1,6 \cdot 10^{-9}$ при технических требованиях не более $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ за сутки.

Таблица 4.1.

Старение ТСКГ при начальном технологическом прогоне

	Образец			
	№185	№170	№171	№174
Старение за период прогона	$1,40 \cdot 10^{-9}$	$-6,6 \cdot 10^{-9}$	$7,20 \cdot 10^{-9}$	$6,80 \cdot 10^{-9}$
Старение в среднем за сутки	$1,59 \cdot 10^{-9}$	$-0,74 \cdot 10^{-9}$	$0,81 \cdot 10^{-9}$	$0,76 \cdot 10^{-9}$

На рисунке 4.5 в виде графика представлены результаты данных измерений в течение периода прогона. Изменения частоты имеют плавный характер и незначительно отклоняются от начального и конечного значений, что говорит о стабильности работы ТСКГ.

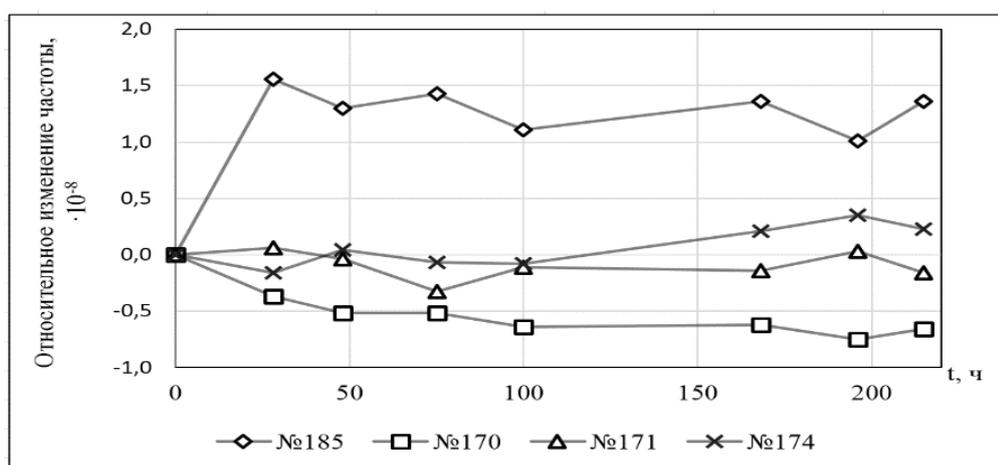


Рис. 4.5. Начальный технологический прогон партии ТСКГ с 5 по 15 день

В таблице 4.2 представлены результаты измерений относительной нестабильности частоты образцов №30 и №45 за сутки, за месяц и за 6 месяцев.

Таблица 4.2.

Долговременная нестабильность двух образцов ТСКГ за сутки, месяц и год

Относительная	образец №30	образец №45	Технические
---------------	-------------	-------------	-------------

долговременная нестабильность частоты			требования
За сутки	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$	$\pm 5 \cdot 10^{-9}$
За месяц	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$
За 6 месяцев	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$\pm 7 \cdot 10^{-8}$

На рис. 4.6 представлены результаты измерений долговременной нестабильности частоты партии ТСКГ на этапе начального технологического прогона с момента включения в течение 13-15 дней в виде относительного изменения частоты во времени от первоначального значения.

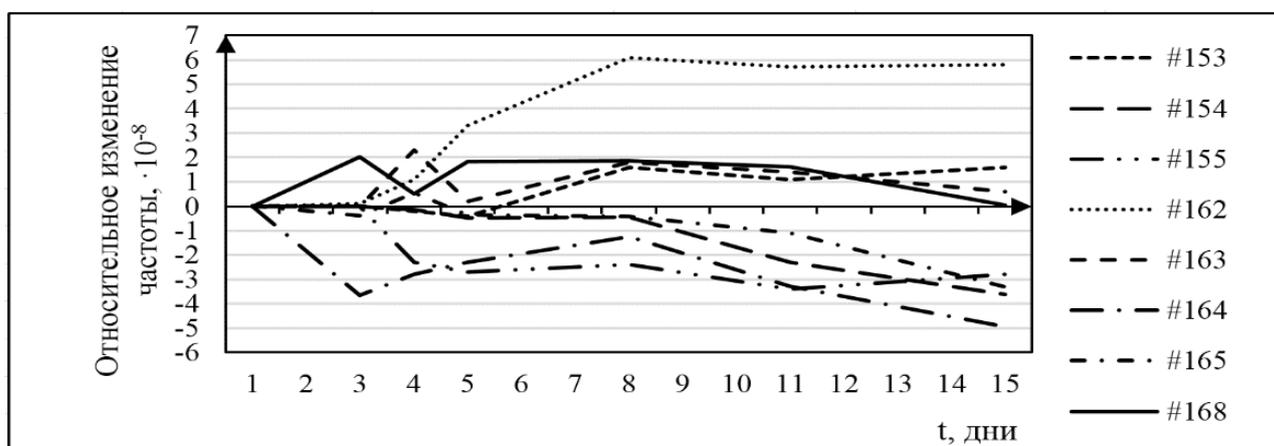


Рис. 4.6. Относительное изменение частоты при начальном технологическом прогоне партии ТСКГ

Из графика на рисунке 4.6 видно, что старение со временем уменьшается, а некоторые образцы демонстрируют величину суточной нестабильности менее $\pm 1 \cdot 10^{-9}$.

В таблице 4.3 представлены значения относительной нестабильности частоты за сутки этих образцов ТСКГ после окончания технологического прогона. Величина относительной нестабильности частоты за сутки всех 8 образцов укладывается в требуемый диапазон $\pm 5 \cdot 10^{-9}$.

Таблица 4.3.

Относительная нестабильность частоты за сутки 10 образцов ТСКГ
после технологического прогона

Образец	#153	#154	#155	#162
---------	------	------	------	------

Нестабильность частоты за сутки	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$-3,3 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Образец	#163	#164	#165	#168
Нестабильность частоты за сутки	$-2,0 \cdot 10^{-9}$	$-4,1 \cdot 10^{-9}$	$-4,9 \cdot 10^{-9}$	$-3,9 \cdot 10^{-9}$

Образцы №153 и №168 при прогоне в течение месяца показали значение нестабильности $+1,0 \cdot 10^{-9}$ и $-5,5 \cdot 10^{-9}$ соответственно. В среднем за сутки значение нестабильности составило $+3,1 \cdot 10^{-11}$ и $-1,77 \cdot 10^{-10}$ соответственно. Положительный или отрицательный знак старения обусловлен преобладанием процессов сорбции или десорбции [21].

На рис. 4.7 представлен график изменения частоты образца №T02 за 76 дней с момента первого включения.

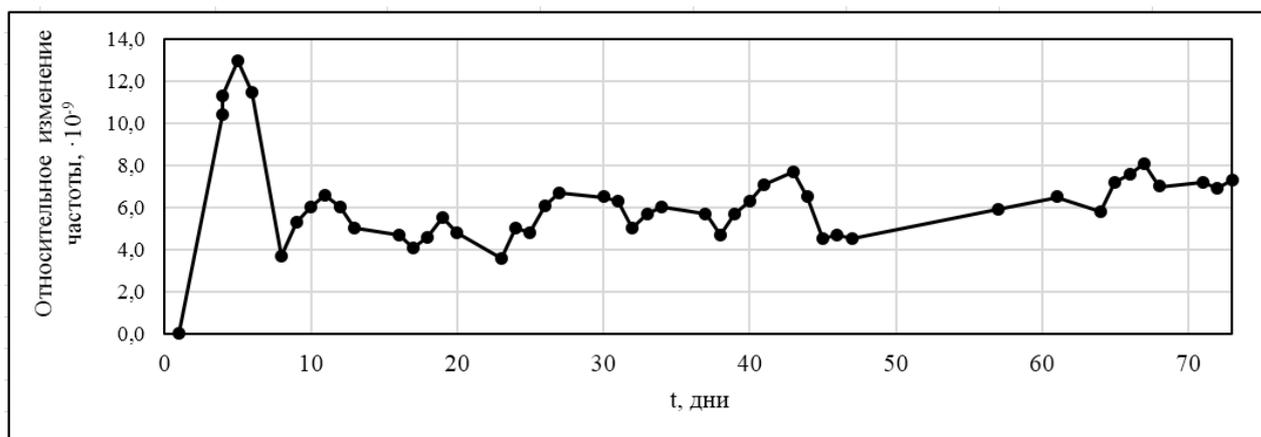


Рис. 4.7. Прогон образца №T02 в течение 76 дней

Величина среднесуточного старения от начального до конечного значения составило $+1 \cdot 10^{-10}$ при требовании не более $\pm 5 \cdot 10^{-9}$, значение старения за месяц составило $+5 \cdot 10^{-9}$ при требовании не более $\pm 3 \cdot 10^{-8}$. При линейной экстраполяции за полгода величина старения составит $+3 \cdot 10^{-8}$ при требовании не более $\pm 7 \cdot 10^{-8}$, за год величина старения составит $+6 \cdot 10^{-8}$ при требовании не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. Следует отметить, что величина старения при линейной экстраполяции является наихудшим вариантом, поскольку многочисленные исследования показали, что

характеристики старения в большинстве случаев описываются логарифмической зависимостью [75]

$$\Delta f/f = A \ln t - B,$$

то есть старение со временем уменьшается, и, следовательно, реальные значения должны быть меньше.

В результате исследования долговременной неустойчивости частоты макетных образцов разработанной конструкции можно сделать вывод, что технология лазерной сварки корпусов РТ с последующим высокотемпературным вакуумным отжигом позволяет добиться хороших результатов по стабильности частоты РТ с гибридным подогревом пьезоэлемента уже на этапе начального технологического прогона, то есть в первые 5...15 дней с момента первого включения. Результаты по долговременной стабильности сравнимы с РТ в стеклянных корпусах и РТ в холодносварных металлостеклянных корпусах.

В таблице 4.4 представлены результаты измерений электрических параметров партии образцов генераторов с РТ разработанной конструкции и приведены в сравнении с генератором М32008, имеющим наименьшее время установления частоты среди аналогов.

Таблица 4.4

Сравнение параметров генератора М32008 с результатами измерений электрических параметров партии образцов с ТСКГ разработанной конструкции

Параметр	М32008	Разработанный
Частота	10,0...12,8 МГц	10,0...12,8 МГц
Резонатор	ТД-срез, 3 мех. гарм	ТД-срез, 3 мех. гарм
Диапазон рабочих температур	-60...70 °С	-60...70 °С

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 в диапазоне рабочих температур	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$
Относительная СПМ фазовых шумов при отстройке от несущей: 10 Гц 100 Гц 1000 Гц 10 кГц и выше	– 118 дБн/Гц – 145 дБн/Гц – 155 дБн/Гц – 160 дБн/Гц	– 118 дБн/Гц – 145 дБн/Гц – 155 дБн/Гц – 160 дБн/Гц
Выходное напряжение на нагрузке 50 Ом	500 мВ	500 мВ
Пределы коррекции частоты	$\pm 4 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4 \cdot 10^{-7}$
Габаритные размеры	36'27'12,7 мм	36'27'12,7 мм
Потребляемая мощность: – в режиме разогрева – в установившемся режиме при НУ	1,5 Вт 0,3 Вт	2,7 Вт 0,25 Вт
Напряжение питания	12 В	12 В

Из результатов измерений параметров образцов ТСКГ разработанной конструкции можно видеть, что в сравнении с параметрами ТСКГ М32008, имеющего наименьшее время установления частоты, время установления частоты сокращено в 2 раза. Потребляемая мощность в режиме разогрева

увеличилась с 1,5 Вт до 2,7 Вт. Остальные основные технические характеристики не ухудшились.

Стоит отметить, что ТСКГ разработанной конструкции имеет время установления частоты 15 с при температуре окружающей среды +20 °С, такое же как у генератора «Спурт» с прямым подогревом ПЭ, однако ТСКГ «Спурт» имеет меньший диапазон рабочих температур и более худшие показатели по КНЧ [24] и уровню плотности мощности фазовых шумов в ближней зоне (при отстройке от несущей менее 100 Гц).

Выводы

Результаты экспериментальных исследований ТСКГ с РТ с конструкцией, разработанной на основании расчётов на температурно-динамической модели, показали возможность снижения времени установления частоты более чем в 2 раза, по сравнению с конструкцией, имеющей минимальное значение, при сохранении остальных показателей. Однако мощность начального разогрева ТСКГ при этом значительно увеличена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы получены следующие результаты:

1. Определены конструктивные и физические факторы, влияющие на тепловые процессы в РТ и, следовательно, на время установления частоты.
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 параметров.

На основе 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 позволяет снизить время выхода на режим радиоэлектронных систем.

В результате проделанной работы также разработан метод поэтапного проектирования резонатора-термостата с распределённым нагревателем

пьезоэлемента для прецизионных термостатированных кварцевых генераторов с использованием расчётов на разработанной модели в виде основной последовательности действий:

1. Анализ требований технического требований по времени установления частоты, потребляемой мощности в режиме разогрева генератора и в установившемся режиме, температурной и долговременной нестабильности частоты, кратковременной нестабильности частоты и уровню спектральной плотности мощности фазовых шумов.
2. Выбор конструкции ПЭ.
3. Разработка конструкции РТ и системы термостатирования.
4. Описание топологии элементов конструкции РТ в модели.
5. Ввод в модель параметров материалов и параметров элементов конструкции РТ и системы термостатирования.
6. Расчёт температурного поля в РТ в режиме разогрева.
7. Анализ динамики температурного поля в РТ в режиме разогрева на отсутствие значительных колебаний мощности подогрева, отсутствие перегрева элементов конструкции РТ и определение времени установления частоты.
8. Колебания мощности подогрева незначительны, температурный режим элементов конструкции нормальный и время установления частоты удовлетворяет требованиям технического задания: если ДА, то КОНЕЦ; если НЕТ, то корректировка конструкции РТ и системы терморегулирования и переход к п. 4.

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 металlostеклянном 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. Карагусов, С. В. Ермоленко, А. М. Ярош, А. С. Паленова // Техника радиосвязи. – 2018. – Вып. 1 (36). – С. 121–126.
5. Карагусов, В. И. Исследование динамики тепловых процессов в кварцевом резонаторе-термостате с распределённым нагревателем в режиме разогрева / В. И. Карагусов // 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. Карагусов, В. И. Определение оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза / В. И. Карагусов // Наноиндустрия. – 2019. – № S (89). – С. 373–381.

8. Ложников, А. О. Термостатированный кварцевый генератор с диапазоном частот 80-130 МГц / А. О. Ложников, В. И. Карагусов, А. В. Розанова // Техника радиосвязи. – 2019. – Вып. 4 (43). – С. 86–93.
9. Карагусов, В. И. Оценка влияния теплового экрана в кварцевом резонаторе-термостате на нестабильность генерируемой частоты / В. И. Карагусов, 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. Карагусов // Радиотехника, электроника и связь : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 5–8 июля 2011 г.). – Омск : Радиотехника, 2011. – С. 535–540.
2. Карагусов, В. И. Термостатированный кварцевый генератор с ультрамалым временем установления частоты / В. И. Карагусов // Техника радиосвязи. – 2015. – Вып. 2 (25). – С. 109–117.
3. Карагусов, В. И. Кварцевая стабилизация частоты, как стратегическая отрасль науки и техники в XX-XXI веках / В. И. Карагусов // 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. Карагусов, В. И. Минимизация времени разогрева активной зоны колебаний пьезоэлемента с прямым термостатированием / В. И. Карагусов // 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. Карагусов, В. И. Уменьшение времени установления частоты прецизионных термостатированных генераторов / В. И. Карагусов // 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. Карагусов, В. И. Определение оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза / В. И. Карагусов // Международный форум «Микроэлектроника-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 // Радиофизика, 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В-мода – термочувствительная поперечная сдвиговая В-компонента

деформаций толщинного колебания

ВУЧ – время установления частоты

КГ – кварцевый генератор

КР – кварцевый резонатор

КРТ – кварцевый резонатор-термостат

МКЭ – метод конечных элементов

ПЭ – пьезоэлемент

РТ – резонатор-термостат

С-мода – основная поперечная сдвиговая С-компонента деформаций

толщинного колебания

СКЧ – силовой коэффициент чувствительности

СЧХ – силочастотная характеристика-

ТД-срез – обозначение принято в качестве группового для ряда срезов

кварцевых пластин, различающихся ориентацией угла вокруг оптической оси

кварца γ в пределах $22...24^\circ$ и ориентацией угла вокруг электрической оси β в

пределах $33,5...35^\circ$ [71]

ТДКЧ – температурно-динамический коэффициент частоты

ТККГ – термокомпенсированный генератор

ТКЧ – температурный коэффициент частоты

ТСКГ – термостатированный кварцевый генератор

ТЧХ – температурно-частотная характеристика

ФНЧ – фильтр нижних частот

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

SC-срез – зарубежный близкий аналог ТД-среза кварцевой пластины

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоменко, И. В. Кварцевые резонаторы и генераторы : учеб. пособие / И. В. Хоменко, А. В. Косых ; Ом. гос. техн. ун-т, – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – 157 с. – ISBN 978-5-1849-2583-1.
2. Тихомиров, В. Г. ТККГ для переговорных устройств и радиотелефонов диапазона частот 1,6-900 МГц / В. Г. Тихомиров // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1992. – Вып. 6. – С. 63–73.
3. Авторское свидетельство № 189030 СССР, МПК H03H 3/04. Пьезорезонатор с температурным управлением частотой колебаний : № 949626/26-9 : заявл. 30.03.1965 : опубл. 17.11.1966 / А. Д. Притцкер, М. И. Штейнер.
4. Авторское свидетельство № 286368 СССР, МПК G05D 23/20. Устройство для регулирования температуры : № 1319044/18-24 : заявл. 17.03.1969 : заявл. 17.03.1969 : опубл. 10.11.1970 / В. А. Кузнецов, И. А. Народицкий, Э. М. Фромберг.
5. Авторское свидетельство № 315262 СССР, МПК H03B 5/32. Термостатируемый кварцевый генератор : № 1422088/26-9 : заявл. 30.03.1970 : опубл. 21.09.1971 / К. М. Горшков, С. И. Евтянов.
6. Альтшуллер, Г. Б. Кварцевая стабилизация частоты / Г. Б. Альтшуллер. – Москва : Связь, 1974. – 272 с.
7. Ингберман, М. И. Термостатирование в технике связи / М. И. Ингберман, Э. М. Фромберг, Л. П. Грабой. – Москва : Связь, 1979. – 143 с.
8. Прецизионные кварцевые резонаторы срезов $uxbl/-\alpha^o/+35^o$ / Л. П. Кузнецова, Г. Г. Перельман, А. Н. Дикиджи, Л. Ш. Дикиджи // Электронная техника. Сер. Радиокомпоненты. – 1968. – Вып. 4. – С. 3–11.
9. Венгеровский, Л.В. Системы термостатирования в радиоэлектронике / Л.В. Венгеровский, А.Х. Вайнштейн / Сер. Библиотека по радиоэлектронике, вып. 20. – Ленинград : Изд-во Энергия, Ленинградское отделение, 1969. – 78 с.
10. О возможности уменьшения времени установления частоты в высокостабильных кварцевых генераторах / А. Н. Голиков [и др.] // Вопросы

радиоэлектроники. Сер. 10, Техника радиосвязи. – 1970. – Вып. 7. – С. 88-95.

11. Особенности процесса установления частоты кварцевых резонаторов различных срезов в условиях быстрого разогрева / Р. М. Шевчук [и др.] // Радиотехника и радиосвязь на железнодорожном транспорте : научные труды / Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Омск: ОМИИТ. – 1972. – С. 58-66.

12. Теренько, В. С. О силовом коэффициенте частоты кварцевых резонаторов / В. С. Теренько, Л. Е. Ивлев // Электронная техника. Сер. Радиокомпоненты. – 1968. – Вып. 5. – С. 45–51.

13. Ивлев, Л. Е. Влияние нестационарного теплового режима на частоту прецизионных кварцевых резонаторов / Л. Е. Ивлев, А. Н. Дикиджи // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и компоненты. – 1968. – Вып. 4. – С. 12–21.

14. Фромберг, Э. М. О расчёте времени установления температуры в термостате / Э. М. Фромберг, А. Н. Голиков // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. – 1973. – Вып. 1. – С. 106–112.

15. Фромберг, Э. М. О возможности использования кварцевых резонаторов в качестве температурных датчиков систем термостатирования / Э. М. Фромберг, И. А. Народицкий // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. – 1969. – Вып. 2. – С. 65–70.

16. Шитиков, Г. Т. Высокостабильные кварцевые автогенераторы / Г. Т. Шитиков, П. Я. Цыганков, О. М. Орлов. – Москва : Советское радио, 1974. – 375 с.

17. Штерн, Э. Т. Об эффективности использования сосудов Дьюара для теплоизоляции малогабаритных кварцевых резонаторов / Э. Т. Штерн // Электронная техника. Сер. 9, Радиокомпоненты. – 1968. – Вып. 3. – С. 90-95.

18. Авторское свидетельство № 166745 СССР, МПК H03H 3/04. Пьезоэлектрический резонатор с нагревательным элементом : № 824443/26-9 :

заявл. 12.03.1963 : опубл. 01.12.191964 / Э. Г. Маркосян, П. Г. Поздняков.

19. Авторское свидетельство № 243977 СССР, МПК H03B 5/32. Устройство для стабилизации частоты генераторов : № 1168743/18-10 : заявл. 03.07.1967 : опубл. 14.05.1969 / А. Н. Дикиджи, Л. Ш. Дикиджи, Л. Е. Ивлев, Л. П. Кузнецова, Г. Г. Перельман, В. С. Теренько.

20. Авторское свидетельство № 391544 СССР, МПК G05D 23/30. Термостат для кварцевых резонаторов : № 1682270/18-24 : заявл. 12.07.1971 : опубл. 25.07.1973 / Г. Б. Альтшуллер, Г. Г. Грачев, П. С. Куканов-Артемов, С. И. Лассовик, В. А. Романов, Н. И. Сизов, В. С. Цымбалюк, Г. А. Чистяков.

21. Справочник по кварцевым резонаторам / В. Г. Андросова, В. Н. Банков, А. Н. Дикиджи [и др.] ; под. ред. П. Г. Позднякова. – Москва : Связь, 1978. – 287 с.

22. Альтшуллер, Г. Б. Экономичные миниатюрные кварцевые генераторы / Г. Б. Альтшуллер, Н. Н. Елфимов, В. Г. Шакулин. – Москва : Связь, 1979. – 159 с.

23. Семиглазов, А. М. Кварцевые генераторы / А. М. Семиглазов. – Москва : Радио и связь, 1982. – 87 с.

24. Тихомиров, В. Г. Современное состояние и тенденции развития опорных кварцевых генераторов для аппаратуры радиосвязи / В. Г. Тихомиров, А. И. Куталев, А. Н. Дикиджи // Информационные технологии и радиосети - 96 : материалы первой Междунар. науч.-практ. конф. (Омск, 6–8 февр. 1996 г.) : материалы конф. / Ом. гос. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГУ, 1996. – С. 50–51.

25. Авторское свидетельство № 476665 СССР, МПК H03H 3/02. Термостабилизированный пьезоэлектрический резонатор : № 1824772 : заявл. 04.09.1972 : опубл. 05.07.1975 / Б. А. Соколов, Я. Л. Вороховский, И. Г. Петросян, Е. М. Смирнов, О. М. Шаталов.

26. Ballato, A. Doubly Rotated Thickness Mode Plate Vibrators / A. Ballato // Physical Acoustics. – 1977. – Vol. 13. – P. 115–181.

27. Авторское свидетельство № 555386 СССР, МПК G05D 23/30. Термостат для кварцевых резонаторов : № 2191978 : заявл. 20.11.1975 : опубл.

25.04.1977 / А. А. Волков, Я. Л. Вороховский, А. В. Гробов, В. Б. Грузиненко, И. Б. Хигрин, О. М. Шаталов.

28. Авторское свидетельство № 568044 СССР, МПК G05D 23/30. Термостат : № 2069365 : заявл. 18.10.1974 : опубл. 05.08.1977 / Я. Л. Вороховский, А. А. Волков, Е. М. Смирнов.

29. Вороховский, Я. Л. Кварцевый резонатор-термостат с саморегулирующимся позисторным нагревателем / Я. Л. Вороховский, В. Б. Грузиненко, И. Г. Петросян // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и компоненты. – 1977. – Вып. 3 (22). – С. 18–29.

30. Вороховский, Я. Л. Интегральное пьезоэлектрическое устройство - генератор - термостат / Я. Л. Вороховский, А. А. Волков, В. Б. Грузиненко // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1978. – Вып. 5 (30) – С. 58–61.

31. Теренько, В. С. Влияние локального нагрева на частоту круглых пьезоэлементов с колебаниями сдвига по толщине / В. С. Теренько, В. П. Багаев // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1978. – Вып. 1 (26). – С. 34–37.

32. Иванов, А. А. К вопросу проектирования кварцевых микрогенераторов / А. А. Иванов, В. С. Теренько, В. П. Тихомиров // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1979. – Вып. 10 (27). – С. 31–34.

33. Вороховский, Я. Л. Управление зоной термостабилизации резонатора-термостата с саморегулирующимся позисторным нагревателем / Я. Л. Вороховский, В. Б. Грузиненко, И. Г. Петросян // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1979. – Вып. 6 (37). – С. 48–55.

34. Авторское свидетельство № 830345 СССР, МПК G05D 23/19. Устройство для регулирования температуры : № 2791176 : заявл. 06.07.1979 : опубл. 15.05.1981 / Л. Г. Борисов, Г. Г. Морданов, Я. Л. Вороховский, А. А. Волков.

35. Авторское свидетельство № 851352 СССР, МПК G05D 23/19. Терморегулятор : № 2842514 : заявл. 21.11.1979 : опубл. 30.07.1981 / А. А.

Волков, Л. А. Лейбович, В. М. Кейн, Я. Л. Вороховский, Л. Г. Борисов.

36. Авторское свидетельство № 920657 СССР, МПК G05D 23/19. Устройство для регулирования температуры : № 2951287 : заявл. 04.07.1980 : опубл. 15.04.1982 / Л. Г. Борисов, А. А. Волков, Я. Л. Вороховский.

37. Разработка микроэлектронной технологии производства кварцевых резонаторов-термостатов / Н. И. Алексеева, В. В. Бахтинов, А. Н. Дикиджи [и др.] // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1983. – Вып. 10 (31). – С. 109–114.

38. Альтшуллер, Г. Б. Кварцевые генераторы : справ. пособие / Г. Б. Альтшуллер, Н. Н. Елфимов, В. Г. Шакулин. – Москва : Радио и связь, 1984. – 232 с.

39. Кварцевые резонаторы-термостаты / А. А. Волков, Я. Л. Вороховский, И. Г. Петросян, И. С. Трошин // Электронная промышленность. – 1984. – Вып. 1. – С. 64–66.

40. Гончаров, Ю. М. Высокостабильный кварцевый генератор / Ю. М. Гончаров, С. И. Липко, А. Ф. Дмитриев // Микроминиатюризация электронной аппаратуры. – Москва : ЦНИИТЭИ, 1985. – С. 62–64.

41. Федяев, И. Ф. Температурно-механическая компенсация нестабильности частоты кварцевых генераторов / И. Ф. Федяев // Стабилизация частоты и прецизионная радиотехника : [Сб. ст.]. – Москва : МЭИ, 1985. – с. 33–36.

42. Кварцевый резонатор-термостат с резистивным или транзисторным нагревателем / А. Н. Дикиджи, Н. И. Алексеева, В. В. Бахтинов, В. Г. Тихомиров // Проблемы радиосвязи, стабилизации частоты и акустоэлектроники : тез. докл. III обл. науч.-тех. конф. – Омск : [б. и.], 1987. – С. 38–39.

43. Вороховский, Я. Л. Выбор и построение терморегулятора для резонатора-термостата прецизионного кварцевого генератора / Я. Л. Вороховский, Б. Г. Драхлис // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1987. – Вып. 2 (67). – С. 67–70.

44. Интегральные устройства пьезоэлектроники с внутренним

термостатированием / Я. Л. Вороховский, В. Б. Грузиненко, А. В. Золотов, Н. Н. Лепешкин // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1987. – Вып. 3 (68). – С. 52–56.

45. Построение высокостабильных экономичных малогабаритных кварцевых генераторов с малым временем установления частоты на резонаторах термостатах / А. А. Волков, Я. Л. Вороховский, Б. Г. Драхлис [и др.] // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1987. – Вып. 4 (69). – С. 59–64.

46. Федяев, И. Ф. Исследование составляющих средневременной стабильности высокочастотных прецизионных кварцевых генераторов / И. Ф. Федяев // Тезисы юбилейной научно-технической конференции / Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения. – Омск : ОНИИП, 1988. – С. 106–107.

47. Дикиджи, А. Н. О применении среза ТД при производстве кварцевых резонаторов / А. Н. Дикиджи, В. С. Теренько // Тезисы юбилейной научно-технической конференции / Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения. – Омск : ОНИИП, 1988. – С. 142–143.

48. Конструирование и технология изготовления миниатюрных кварцевых генераторов для аппаратуры связи IV-V поколения / В. Г. Тихомиров, А. Н. Дикиджи, А. И. Куталев, В. В. Бахтинов // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1988. – Вып. 6. – С. 32–38.

49. Вороховский, Я. Л. Прецизионные маложужащие кварцевые генераторы с малым временем установления частоты на резонаторах-термостатах срезов АТ и SC / Я. Л. Вороховский, Б. Г. Драхлис, К. Г. Кожемякин // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1989. – Вып. 3 (76). – С. 49–53.

50. Способ компенсации погрешности термостатирования кварцевого резонатора в термостатированном генераторе / Ю. В. Скобелкин, И. В. Финкель // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1989. – Вып. 3 (76). – С. 55–57.

51. Шмалый, Ю. С. Модуляционный метод адаптации опорных кварцевых

автогенераторов / Ю. С. Шмалый, Ю. И. Евдокименко // Стабилизация частоты. – Москва : ВИМИ, 1989. – Ч. 1. – С. 75–78.

52. Шмалый, Ю. С. Адаптивная система прецизионного термостатирования опорных кварцевых автогенераторов / Ю. С. Шмалый, Ю. И. Евдокименко // Радиотехнические пьезоэлектронные устройства : межвуз. темат. сб. науч. тр. / Ом. политехн. ин-т. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1990. – С. 22–27.

53. Альтшуллер, Г. Б. Способ уменьшения мощности, рассеиваемой в кварцевом резонаторе / Г. Б. Альтшуллер, В. А. Ляпин // Радиотехнические пьезоэлектронные устройства : межвуз. темат. сб. науч. тр. / Ом. политехн. ин-т. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1990. – С. 43–47.

54. Зеленка, И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение / И. Зеленка : пер. с чешск. И. А. Рокоса ; под ред. И. С. Реза. – Москва : Мир, 1990. – 583 с. – ISBN 5-03-001086-6.

55. Шмалый, Ю. С. Возможность адаптивной стабилизации частоты опорных кварцевых автогенераторов / Ю. С. Шмалый // Кварцевая стабилизация частоты : науч. тр. 2-го межотраслевого науч.-техн. семинара. – Харьков, 1991. – Ч. 2. – С. 3–19.

56. Vorokhovsky, Y. High-stability quartz oscillators on internally-heated quartz resonators with AT and SC cuts / Y. Vorokhovsky, B. Drakhlis. – DOI: 10.1109/FREQ.1991.145934 // Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control / Los Angeles, CA, USA. – IEEE, 1991.

57. Abramson, I. Internal heated quartz resonator with low sensitivity to an accelerator / I. Abramson. – DOI: 10.1109/FREQ.1995.484093 // International Frequency Control Symposium / San Francisco, CA, USA. – IEEE, 1995. – P. 838–842.

58. Abramzon, I. Miniature OCXO Using DHR Technology / I. Abramson, R. Boroditsky, D. Cocuzzi. – DOI: 10.1109/FREQ.1997.639213 // International Frequency Control Symposium / Orlando, FL, USA. – IEEE, 1997. – P. 943–946.

59. Патент № 2101854 Российская Федерация, МПК H03H 9/19, H03H 9/08.

Кварцевый резонатор термостат : № 96100802/09 : заявл. 12.01.1996 : опубл. 10.01.1998 / И. В. Абрамзон.

60. Weiss, K. A Simple Method for SC-Cut Resonator Design / K. Weiss // IEEE transactionson ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 2001. – Vol. 48. – 2001. – P. 1508–1512.

61. Abramzon, I. Optimization of Drive-Level in High Stability Low-Noise OCXOs / I. Abramzon, V. Tapkov, S. Baranushkin // International Frequency Control Symposium and Exposition. – IEEE, 2004. – P. 742–747.

62. Abramzon, I. Influence of Resonator Factors on Phase-Noise of OCXOs // I. Abramzon, A. Gubarev, O. Rotova, V. Tapkov. – URL: <https://magicxtal.com/customer/Proceedings%20of%20EFTF2006.pdf> (дата обращения: 11.10.2022).

63. High-stability miniature OCXOs based on advanced IHR technology / I. Abramzon, S. Baranushkin, A. Gubarev [et al.] // International Frequency Control Symposium. – IEEE, 2007. – P. 242–245.

64. Бахтинов, В. В. Исследование внутреннего газообмена в миниатюрных кварцевых резонаторах- и генераторах-термостатах / В. В. Бахтинов, Д. И. Петриди, А. М. Ярош // Техника радиосвязи. – 2007. – Вып. 12. – С. 102–107.

65. Патент № 2349025 Российская Федерация, МПК H03H 3/00. Способ изготовления миниатюрного кварцевого генератора (резонатора)-термостата : № 2007118326/09 : заявл. 16.05.2007 : опубл. 10.03.2009 / В. В. Бахтинов, Д. И. Петриди, А. М. Ярош ; заявитель Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения.

66. Хоменко, И. В. Исследование термостатированного кварцевого генератора с двухмодовым возбуждением резонатора ТД-среза на численно-аналитической модели / И. В Хоменко // Россия молодая: передовые технологии - в промышленность : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 12–13 нояб. 2008 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – Кн. 1. – С. 235–240.

67. Хоменко, И. В. Исследование термочастотного датчика на основе кварцевого резонатора ТД-среза с помощью численно-аналитической модели / И. В. Хоменко // Современное состояние и перспективы развития специальных

систем радиосвязи и радиоуправления : тез. докл. юб. науч.-техн. конф. – Омск : Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения, 2008. – С. 90–91.

68. Ермоленко, С. В. Выбор режимов термостабилизации кварцевых резонаторов в вакуумных металlostеклянных корпусах / С. В. Ермоленко, Д. И. Петриди, А. М. Ярош // Техника радиосвязи. – 2009. – Вып. 14. – С. 116–120.

69. Ермоленко, С. В. Сравнительный анализ кварцевых резонаторов одно- и двухповоротных срезов для опорных генераторов / С. В. Ермоленко, А. Н. Дикиджи, Т. В. Ложникова // Техника радиосвязи. – 2011. – Вып. 16. – С. 87–95.

70. Ярош, А. М. Технологические особенности изготовления миниатюрных кварцевых резонаторов на 10 МГц / А. М. Ярош, Г. В. Безматерных, С. В. Ермоленко // Радиотехника, электроника и связь : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 5–8 июля 2011 г.). – Омск : Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения, 2011. – С. 525–529.

71. Патент на полезную модель № 128042 Российская Федерация, МПК Н03Н3/00. Миниатюрный кварцевый резонатор-термостат : № 2012136182 : заявл. 22.08.2012 : опубл. 10.05.2013 / В. В. Бахтинов, С. В. Ермоленко, А. М. Ярош ; заявитель ОАО «Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения».

72. Abramzon, I. Utmost OCXO Solutions Based on the IHR Technology / I. Abramzon, V. Tapkov // Microwave Journal. – 2014. – Vol. 57, no. 4. – P. 96–100.

73. Паленова, А. С. Исследование процессов газовой выделенной в вакуумном металlostеклянном корпусе с микроплатой, выполненной по LTCC-технологии / А. С. Паленова, А. М. Ярош, С. В. Ермоленко // Техника радиосвязи. – 2016. – Вып. 4 (31). – С. 119–125.

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

75. Пьезоэлектрические резонаторы : справ. / под ред. П. Е. Кандыбы, П. Г. Позднякова. – Москва : Радио и связь, 1992. – 390 с. – ISBN 5-256-00634-7.

76. Ballato, A. Static and dynamic frequency-temperature behavior of singly and

doubly rotated oven controlled quartz resonators / A. Ballato A., J. Vig // 32nd Annual Symposium on Frequency Control / Atlantic City, NJ, USA. – IEEE, 1978. – P. 180–188.

77. Поздняков, П. Г. Кварцевые резонаторы с плёночными нагревателями / П. Г. Поздняков, И. М. Федотов, В. И. Бирюков // Электронная техника. Сер. 9. – 1971. – Вып. 4 – С. 27–37.

78. Поздняков, П. Г. Тепловое зондирование колеблющихся пьезоэлектрических пластин / П. Г. Поздняков, И. М. Федотов // Доклады АН СССР. – 1972. – Т. 205, № 6. – С. 1339–1342.

79. Вороховский, Я. Л. Переходные характеристики кварцевых резонаторов-термостатов на базе саморегулирующихся позисторных элементов / Я. Л. Вороховский, М. В. Шапиро // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1977. – Вып. 3 (22). – С. 30–42.

80. Чернядьев, А. Д. Проектирование экономичных высокостабильных кварцевых генераторов на резонаторах термостатах / А. Д. Чернядьев, С. И. Лассовик, Г. Б. Альтшуллер // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1978. – Вып. 4 (20). – С. 150–158.

81. Дикиджи, А. Н. Миниатюрные малозумящие кварцевые генераторы для цифровых станций спутниковой связи / А. Н. Дикиджи, А. И. Куталев, В. Г. Тихомиров // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1994. – Вып. 1. – С. 40–45.

82. Иванов, А. А. Кварцевый резонатор-термостат с прямым термостатированием пьезоэлемента / А. А. Иванов, В. С. Теренько, В. П. Тихомиров // Электронная техника. Сер. 5. – 1983. – Вып. 1 (50). – С. 76–78.

83. Long, B. Quartz crystal oscillators with direct resonator heating / B. Long, G. Weaver // 45th Annual Symposium on Frequency Control / Los Angeles, CA, USA. – IEEE, 1991. – P. 384–392.

84. Abramson, I. V. Improvement of characteristics of quartz resonator-thermostat with direct heating piezoelement / I. V. Abramson, A. N. Dikidzhi // International Frequency Control Symposium / Hershey, PA, USA. – IEEE, 1992. – P.

499–504.

85. Куталев, А. И. Кварцевый резонатор-термостат с распределённым нагревателем / А. И. Куталев // Техника радиосвязи. – 2007. – Вып. 12. – С. 78–87.

86. 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.

87. Куталев А. И. Влияние температурно-динамических эффектов в кварцевом резонаторе-термостате на кратковременную нестабильность частоты и уровень фазовых шумов кварцевого генератора / В. И. Куталев // Техника радиосвязи. – 2003. – Вып. 8. – С. 112–119.

88. Abramson, I. OCXO design using composite-heating of the crystal resonator / I. Abramson // IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control. –1994. – Vol. 41, no. 2. – P. 284–289.

89. Патент № 2155442 Российская Федерация, МПК H03H 9/19, H03H 9/15, H03H 9/15. Кварцевый резонатор с внутренним термостатированием : № 99111816/09 : заявл. 04.06.1999 : опубл. 27.08.2000 / И. Г. Петросян : заявитель ОАО «Морион».

90. Abramzon, I. Long-term stability of evacuated hybrid OCXO / I. Abramzon, R. Boroditsky // International Frequency Control Symposium / Seattle, WA, USA. – IEEE, 2001. – P. 786–789.

91. Куталев, А. И. Высокостабильные генераторы на основе кварцевых резонаторов-термостатов / А. И. Куталев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2010. – Вып. 12. – С. 67–72.

92. Patent № 2607818 US, IPC H03H 9/08. Thermostatically controlled crystal unit : № 76933 : application 17.02.1949 : publ. 10.08.1952 / Н. К. Richards. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/80/47/e44f36e8b0d110/US2607818.pdf> (дата обращения: 16.11.2016).

93. Косых, А. В. Динамическая температурная модель термостатированного кварцевого генератора с композиционным нагревом / А. В.

Косых. В. И. Карагусов // Радиофизика, 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.

94. ОСТ 107.060601.001-88. Термостаты для радиоэлектронных устройств. Методы расчета : изд. офиц. : дата введ. 1989-01.01. – Москва, 1988. – 129 с.

95. Дульнев, Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Ленинград : Энергия, 1968. – 359 с.

96. 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.

97. 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.

98. Хоменко, И. В. Численно-аналитический метод расчета распределения амплитуд смещений толщинно-сдвиговых колебаний на поверхности резонаторов двухповоротных срезов / И. В. Хоменко, А. Н. Лепетаев, А. В. Косых // Современные компоненты и устройства на основе пьезоэлектрических монокристаллов : сб. тр. науч.-техн. конф. «Пьезо-2008». – Москва : Тривант, 2008. – С. 7–12.

99. Хоменко, И. В. Исследование параметров терморегулятора на тепловой модели кварцевого генератора / И. В. Хоменко // Современные компоненты и устройства на основе пьезоэлектрических монокристаллов : сб. тр. науч.-техн. конф. «Пьезо-2008». – Москва : Тривант, 2008. – С. 13–17.

100. Nagler O. Application of FEM and SPICE Simulation for Design Optimization of Oven-Controlled Crystal Oscillators / O. Nagler, B. Hillerich // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2001. – Vol. 48, no.

6. – P. 1662–1668.

101. Finit element analysis of activity dips in NLC-cut quartz temperature sensors / B. Dulmet, R. Bourquin, L. Spassov, R. Velcheva // 16-th European Frequency and Time Forum. – St. Petersburg, 2003. – P. D-033-D-036.

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

103. Смагин, А. Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А. Г. Смагин, М. И. Ярославский. – Москва : Энергия, 1970. – 488 с.

104. Физические величины : справ. / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

105. 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.

106. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – Москва : Металлургия, 1989. – 383 с. – ISBN 5-229-00260-3.

107. Gufflet, N. Quartz Crystal Resonators : Brief Overview / N. Gufflet // KVG Quartz Crystal Technology. Neckarbischofsheim. 2003. – URL: <https://www.kvg-gmbh.de/assets/uploads/files/pdf/IntroductionQuartz.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).

108. Голиков, А. Н. Терморегулятор с непрерывным регулированием и независимым термодатчиком : информ. листок МРП № 020246 / А. Н. Голиков, Э. М. Фромберг, В. М. Кейн. – Москва, 1969.

109. Фромберг, Э. М. О повышении точности регулирования терморегулятора / Э. М. Фромберг, В. М. Кейн, А. Н. Голиков // Радиоприборостроение и микроэлектроника : сб. тр. электротехн. фак. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1971. – С. 163–170.

110. Исследование прецизионных систем автоматической стабилизации

температуры с помощью моделирующих устройств / Э. М. Фромберг, П. Н. Хломенок, В. И. Лепешин, А. Н. Голиков // Радиоприборостроение и микроэлектроника : сб. тр. сб. тр. электротехн. фак. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1971. – С. 153–162.

111. Кейн, В. М. Конструирование терморегуляторов / В. М. Кейн. – Москва : Советское радио, 1971. – 152 с.

112. Бондаренко, Е. В. Оценка влияния окружающей среды на стабильность полупроводниковых терморезисторов – датчиков температуры / Е. В. Бондаренко, Э. Ф. Кравец, В. И. Красина // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. – 1972. – Вып. 2. – С. 62–63.

113. Голиков, А. Н. Расчет статической ошибки схемы непрерывного регулирования с независимым датчиком / А. Н. Голиков, Э. М. Фромберг // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. – 1972. – Вып. 2. – с. 76-82.

114. Певзнер, В. В. Прецизионные регуляторы температуры / В. В. Певзнер. – Москва : Энергия, 1973. – 192 с.

115. Волков, А. А. Экспериментальное исследование теплопроводности полупроводников - материалов для терморезистивных элементов / А. А. Волков, Я. Л. Вороховский // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и компоненты. – 1977. – Вып. 6 (25). – С. 61–64.

116. 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.

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

118. 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.

119. Хоменко, И. В. Модель собственных колебаний по толщине для пьезокварцевых пластин резонаторов одно и двухповоротных срезов / И. В. Хоменко, А. Н. Лепетаев, А. В. Косых, // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2012. – № 3 (113). – С. 314–319.

120. Баржин, В. Я. Влияние температурных полей термостата на тепловое состояние пьезоэлемента / В. Я. Баржин, О. Г. Вербицкий, Э. Б. Крутофалов // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и компоненты. 1978. – Вып. 5 (30). – С. 51–57.

121. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши ; пер. с англ. И. Е. Зино, В. Л. Грязнова ; под ред. В. И. Полежаева. – Москва : Мир, 1988. – 544 с. – ISBN 5-03-001215-X.

122. 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.

123. Ложников, А. О. Улучшение моночастотности кварцевых резонаторов двухповоротных срезов организацией пространственной селекции мод : специальность 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» : дис. канд. техн. наук / А. О. Ложников ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2017. – 134 с.

124. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Текст дескрипторного файла описания расчёта времени установления частоты в ПЭ с прямым термостатированием в программе FlexPDE

title " Thermal Analysis of direct heating piezoelement"

{SC cut, f0 = 10 MHz, n = 3, Rc = 300 mm, 10x7x0.54 mm }

COORDINATES

cartesian('x','z') {2 Dimensions}

SELECT

errlim = 0.001

nodelimit = 800

contours = 20

VARIABLES

Tp(threshold=100){ the temperature variable, with approximate size } !!!

DEFINITIONS

Tu=293 {Enviromental temperature, K}

Tz = 348 {Target temperature, K}

P=0

P1=1.5 !W=0

Vnagr=1.056e-12

Sn = 0.022*0.0006

Q = P/Sn !P*t !/(cni*rhon*Vnagr) {Q = P/Vnagr}

Kx= 5.86 !6.82 Wt/(m*K) ! thermal conductivity on axe X with Tu=293 K, 6.82e-3 Wt/(mm*K)

Kz= 8.52 ! 9.98 with t=25C, 8.261532 with t=80C, 11.43 Wt/(m*K) pri t=0 C -

ugol"teta=34"

Knich= 12.5 ! nichrom thermal conductivity with 293 K, Wt/(m*K)

!Kni= 91 ! nickel thermal conductivity with 293 K, Wt/(m*K)

alpha=(7.9e-6) ! 0.0075 Wt/(m*K) - vacuum Air

Co=5.67 !5.67e-8 Wt/m^2K

Spe=70

Skor=220

Epe=0.87 !stepen chernoty PE

Ekor=0.1 ! stepen chernoty korpusa

Epk= 1/(1/Epe +Spe/Skor*(1/Ekor-1))

beta= Epk * Co * Spe ! radiation coefficient

Lx = 0.010 ! Plate length (in X'-direction) (m)

Lz = 0.007 ! Plate width in Z'-direction) (m)

Ly = 0.0005 ! Plate height (thickness) in Y-direction) (m)

Lex = 0.004 ! electrode length (m)

Lez = 0.004 ! electrode width (m)

Rb = 3

Ra = 2.99

Rc = 3.03 ! contour radius (m)

re = 0.001 ! fillet radius

a=0.0005

b=0.001

h0 = 0.0005486 ! thickness in center (m)

Lcz = 0.001 ! connectors width (m)

he = 0.0000004 ! (m) electrode thickness Ag=0.0003 Au=0.0001(mm)

hn = 0.0000004 ! (m) heater thickness Ni=0.0004 (mm) !!!

qu ! 1, if on PE, 0 otherwise

m ! 1, if on electrode, 0 otherwise

n ! 1, if on nikel heater, 0 otherwise

nich ! 1, if on nichrom bracket, 0 otherwise

$\rho_{oe} = 12500$! electrode density, kg/m³ (Ag+Au)

$\rho_{hn} = 8900$! nikel heater density, kg/m³

$\rho_{nich} = 8200$! nichrom heater density, kg/m³

$K_e = 401 \cdot h_e / 0.00054$! electrode thermal conductivity, W/(m*K)

$K_{ni} = 90.4 \cdot h_n / 0.00054$! nikel heater thermal conductivity, W/(cm*K)

$m_s = m \cdot \rho_{oe} \cdot h_e$ {nalichie electrode*electrode density*electrode thickness}

$n_s = n \cdot \rho_{hn} \cdot h_n$ {nalichie nikel nagrevatelia* heater density*heater thickness }

$c = 735$ $\rho_l = 2649$ {c- quartz specific heat, Joule/Kelvin/kg, ρ_l – quartz density, kg/m³}

$c_{ni} = 500$! Jhoul/(kg*K) nickel specific heat

$L_{cz2} = L_{cz} / 2$ $w_{m2} = w_m / 2$ $w_{mq} = w_m^2$

$L_{x2} = L_x / 2$ $L_{z2} = L_z / 2$ $L_{ex2} = L_{ex} / 2$ $L_{ez2} = L_{ez} / 2$

$N_{x1} = L_{x2} - 0.001$ $N_{x2} = L_{x2} - 0.0016$ $N_{x3} = L_{x2} - 0.001$ $N_{z1} = L_{z2} - 0.0002$ $N_{z2} = L_{z2} - 0.0008$

$t_{max} = \text{eval}(T_p, -L_{x2}, -0.0025)$! on thermistor - not used

$q_t = \text{vector}((1/h_0) \cdot (K_x + K_e \cdot m + K_{ni} \cdot n + K_{nich} \cdot nich) \cdot 1 \cdot dx(T_p + T_u), (1/h_0) \cdot (K_z + K_e \cdot m + K_{ni} \cdot n + K_{nich} \cdot nich) \cdot 1 \cdot dz(T_p + T_u))$

{temperature vector with thermal conductivity on axes X, Z s uchetom nalichia elektrode or heater }

$T_n = \text{if } T_p < T_z \text{ then } T_u + Q / (c_{ni} \cdot \rho_{hn} \cdot V_{nagr}) \text{ else } T_z$! temperature change

$T_{el} = (\text{sintegral}(T_p, 'Electrode') / \text{sintegral}(1, 'Electrode'))$

INITIAL VALUES

$T_p = T_u$ {environmental temperature on start }

EQUATIONS

$T_p: \text{div}(q_t) + Q \{- 2 \cdot \alpha \cdot (T_p - T_u) - 2 \cdot \beta \cdot ((T_p/100)^4 - (T_u/100)^4)\} = c \cdot \rho_l \cdot 1 \cdot dt(T_p)$

{temperature vector divergation on axes X, Z with convection and radiation losses }

{ ρ_l – quartz density, kg/m³, $dt(T_p)$ - temperature derivative on time, c- quartz specific heat, Joule/Kelvin/kg }

BOUNDARIES

region 'Plate'

qu = 1 m = 0 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (-5e-3, -3.5e-3) natural(Tp) = - 1*alpha*(Tp-Tu)

line to(5e-3, -3.5e-3) fillet(re) line to(5e-3, -a) line to(5e-3, a)

line to(5e-3, 3.5e-3) fillet(re) line to(-5e-3, 3.5e-3) fillet(re)

line to(-5e-3, a) line to(-5e-3, -a) line to finish fillet(re)

region 'Contact_Agat_1'

qu = 1 m = 0.5 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (-5e-3, -3.5e-3) line to(-3.5e-3, -3.5e-3) to(-3.5e-3, -2e-3)

to (-5e-3, -2e-3) to finish fillet(1e-3)

region 'Electrode'

qu = 1 m = 2 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start 'Electrode' (-2e-3,-2e-3) line to(2e-3,-2e-3)

to(2e-3,2e-3) to(-2e-3,2e-3) to finish

region 'Contact_Agat_2'

qu = 1 m = 1 n=0 nich = 0

Vnagr=0

start (5e-3,3.5e-3) line to(3.5e-3, 3.5e-3) to(3.5e-3,2e-3) to(5e-3,2e-3)

line to finish fillet(1e-3)

region 'Connector_1'

qu = 1 m=1 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (-3.5e-3,3.5e-3) line to(-5e-3,3.5e-3) to(-5e-3,2e-3) to(-3.5e-3,2e-3)
to(-2e-3,1e-3) to(-2e-3,2e-3) to(-3.5e-3,3e-3) to finish

region 'Connector_2'

qu = 1 m=1 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (3.5e-3,-3.5e-3) line to(5e-3,-3.5e-3) to(5e-3,-2e-3) to(3.5e-3,-2e-3)
to(2e-3,-1e-3) to(2e-3,-2e-3) to(3.5e-3,-3e-3) to finish

region 'Bracket_1P'

qu = 4 m = 0 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (0.005,0.00215) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)
line to (0.00635,0.00215) to(0.00635,0.0023) value(Tp) = Tu
line to(0.00635,0.00245) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)
line to (0.005,0.00245) to finish

region 'Bracket_2P'

qu = 4 m = 0 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (0.005,-0.00215) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)
line to (0.00635,-0.00215) to(0.00635,-0.0023) value(Tp) = Tu
line to(0.00635,-0.00245) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)
line to (0.005,-0.00245) to finish

region 'Bracket_1L'

qu = 4 m = 0 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (-0.005,0.00215) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)
line to (-0.00635,0.00215) to(-0.00635,0.0023) value(Tp) = Tu

line to(-0.00635,0.00245) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)

line to (-0.005,0.00245) to finish

region 'Bracket_2L'

qu = 4 m = 0 n = 0 nich = 0

Vnagr=0

start (-0.005,-0.00215) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)

line to (-0.00635,-0.00215) to(-0.00635,-0.0023) value(Tp) = Tu

line to(-0.00635,-0.00245) natural(Tp) = Tp -1*alpha*(Tp-Tu)

line to (-0.005,-0.00245) to finish

region 'Heater_1'

qu = 1 m = 0 n=1 nich = 0

P=P1 !W = P/Sn

start (-3.5e-3,-3.3e-3) natural (Tp) = Tn - alpha*(Tp-Tu)

line to(2.2e-3,-3.3e-3) to(4.8e-3,-0.7e-3) to(4.8e-3,2e-3) to(4.2e-3,2e-3)

to(4.2e-3,-0.5e-3) to(2e-3,-2.7e-3) to(-3.5e-3,-2.7e-3) to finish

region 'Heater_2'

qu = 1 m = 0 n=1 nich = 0

P=P1 !W = P/Sn

start (3.5e-3,3.3e-3) natural (Tp) = Tn - alpha*(Tp-Tu)

line to(-2.2e-3,3.3e-3) to(-4.8e-3,0.7e-3) to(-4.8e-3,-2e-3) to(-4.2e-3,-2e-3)

to(-4.2e-3,0.5e-3) to(-2e-3,2.7e-3) to(3.5e-3,2.7e-3) to finish

time 0 to 10 { establish time range and initial timestep }

MONITORS

for cycle=1

contour(Tp-273)

contour(Tp-273) zoom (-0.00497, -0.00497, 0.00994,0.00994)

contour(Tp-273) zoom (-0.002, -0.002, 0.004,0.004)

PLOTS

for t = endtime

surface(Tp-273)

surface(Tp-273) zoom (-0.00497, -0.00497, 0.00994,0.00994)

surface(Tp-273) zoom (-0.002, -0.002, 0.004,0.004)

history (Tn) at (0,-2.7e-3)

history (Tz-Tel+0.26) FIXED range = (-1, 5) {zoom(0, 0, 4, 5)}

history (Tel-273) !FIXED range = (-1, 5)

history(Tp-273) {at (-Lex2,0)} at (0,0) {at (Lex2,0) at (0,-Lez2)

at (0,Lez2)} at (0.003,-0.0025)

END

Приложение Б

Текст дескрипторного файла описания расчёта времени установления частоты в КРТ с распределённым термостатированием в программе FlexPDE

```

TITLE 'KRT with combined heater'
COORDINATES
CARTESIAN3 ('x','y','z')
SELECT
errlim = 0.001 {0.001 - bistree}
regrid=ON { use fixed grid }
ngrid=25 !25 { smaller grid for quicker run }
nodelimit = 400
contours = 15
VARIABLES
Tp (threshold=100) {the temperature variable, with approximate size}
DEFINITIONS {parameter definitions}
!=====kraeviye uslovia=====
Tend=15
Tuc = 20 {Temperatura sredy, C}
Tzc = 75 {Temperatura statirovania, C}
Tu = 273+Tuc {Temperatura sredy, K}
Tz = 273+Tzc {Temperatura statirovania, K}
!=====Luchusty teploobmen=====
!alpha=0.000079 !alpha=7.9e-5 Wt/(m*K)!vacuum Air
Co=5.67 ! Postoyannaya Stefana-Bolzmana – 5.67e-8 Wt/m^2K; 5.67 dlia etoy
formuli
!-----Ploschadi elementov -----
Spe=0.000070 !odna storona PE
Smp=0.000117 !odna storona MP

```

Sheat=8.4e-6 !!!0.000070

Stranz=6.25e-6

Skor=0.000304 !polovina korpusa s bok. stenkami

!-----Stepen chernoty elementov -----

Epe=0.87 !stepen chernoty PE

Emp=0.93 !stepen chernoty MP

Ekor=0.12 ! stepen chernoty korpusa

Eheat= 0.015 ! stepen chernoty PE heater

Etranz= 0.8 ! stepen chernoty MP transistor

!-----Stepen chernoty vzaimnaya -----

Epek= 1/(1/Epe +Spe/Skor*(1/Ekor-1))

Empk= 1/(1/Emp +Smp/Skor*(1/Ekor-1))

Ehk=1/(1/Eheat +Sheat/Skor*(1/Ekor-1))

Etk=1/(1/Etranz +Stranz/Skor*(1/Ekor-1))

Epemp= 1/(1/Epe +Spe/Smp*(1/Emp-1)) !not used

!-----

beta=0

beta_pek= Epek * Co * Spe ! koefizient izluchenia PE-korpus

beta_mpk= Empk * Co * Smp * 1.4! koefizient izluchenia MP-korpus

beta_heat= Ehk * Co * Sheat

beta_tranz= Etk* Co * Stranz

beta_pemp= Epemp * Co * Spe ! koefizient izluchenia PE-MP !not used

!-----

Qizmpk=beta_mpk*((Ttmp_bot/100)^4-(Tu/100)^4) ! MP Bottom !

Qizheat=beta_heat*((Ttmp_top/100)^4-(Tpe_bot/100)^4) ! MP Top / PE Bottom

Qiztranz=beta_tranz*((Ttr/100)^4-(Tpe_bot/100)^4) ! Transistor / PE Bottom

Qizpemp=beta_pemp*((Ttmp_top/100)^4-(Tpe_bot/100)^4) ! MP Top / PE Bottom

Qizpete=beta_pek*((Tpe_top/100)^4-(Tu/100)^4) ! PE Top / Korpus

Qizpete=beta_pete*((Tpe_top/100)^4-(Tte_bot/100)^4) ! PE Top / TE Bottom

Qiztekor=beta_tekor*((Tte_top/100)^4-(Tu/100)^4) ! TE TOP

Qiz=0

!=====Teplofizicheskie svoystva=====

Kx=1 Ky=1 Kz=1

Kv=0.00079 Cv=0.000072 Plv=0.000129!Cv=0.0072 Plv=0.0129 !vacuum air

!-----Kvartz NEstaz. teploprovodnost i teploemkost -----

Kpex= 8.58-0.0222*(Tp-(223)) ! NEstaz. teploprovodnost kvartza po oci X

Kpey= 11.14-0.033*(Tp-(223)) ! NEstaz. teploprovodnost kvartza po oci Y

Kpez= 14.20-0.045*(Tp-(223)) ! NEstaz. teploprovodnost kvartza po oci Z

Ccrystal= 591.2 +1.8*(Tp-(223)) ! NEstaz. teploemkost kvartza c - Joul/Kelvin/kg

Plcrystal=2649 ! pl -plotnost kvarza 2649kg/m³

!-----

Knich=11.15+0.0167*(Tp-(213)) ! NEstaz. teploprovodnost nichroma

Cnich=452.396+0.042*(Tp-238) ! NEstaz. teploemkost nichroma

Plnich=8200 !Nichrom density 8200 kg/m³, teploemkost 450 Jhoul/(kg*K)

Kcon=25 Ccon=410 Plcon=8850 ! Constantan

Kkr=149 Ckr=714 Plkr=2330 ! Kremniy density (kg/m³) 2330 kg/m³, ckr = 800
teploemkost kremniya, Joul/Kelvin/kg

Ktr=100 Ctr=714 Pltr=2330 ! Termoresistor. Kremniy density (kg/m³) 2330
kg/m³, ckr = 800 - teploemkost kremniya, Joul/Kelvin/kg

Kpol=54-0.16*(Tp-(213))

Cpol=585+2.2*(Tp-213) !Cpol=826

Plpol=3967 ! +50 C - Polikor staz. teploprovodnost polikora Vt/(m*K)

Kel=401 Cel=220 Plel=12500 ! PE Electrode ! PE electrode density
(kg/m³)(18.500*0.0001+10.500*0.0003)/0.0004 (Ag+Au)

C=0 Pl=0

Kni=99.6-0.105*(Tp-213)

Cni=389+0.511*(Tp-213)

Plni=8900

K=Kv { thermal conductivity -- values supplied later }

N=0

```

!=====Nagrevateli=====
P=0
V=0
Vnagrmp=0.0025*0.0025*0.0001 !V=(Lx*Lz*Ly) !m^3 !!! Agat Microplate
Vnagrpe=0.02*0.0004*0.0000002
Q = P/V {Wt/m^3 - udelnaya moshnost istochnika energii}
!=====Vektor teplovogo potoka=====
qt=vector(Kx*dx(Tp), Ky*dy(Tp), Kz*dz(Tp))
{vektor temperatyri: s teploprovodnostiy po osi X,Y,Z}
{!=====Gauss-approksimazia=====
Tau=1
Knx=0.91e6 Knx=1.03e6 Knz=0
Gal= exp(-((Knx*x^2+Kny*y^2+Knz*z^2)/(2*Tau^2)))/Tau*sqrt(2*3.1415926535)
Gamax=globalmax(Gal)
!Gamin=globalmin(Gal)
Ga = Gal/Gamax
!Gaint = sintegral(Ga, 'Electrode_Top')/sintegral(1, 'Electrode_Top') !
Tmax=globalmax(Tp)
Tmin=globalmin(Tp)
DeltTnorm=(Tmax-Tmin)/Tmax !normirovannaya T
TGa= DeltTnorm*Ga !}
!===== Integral Temperatures =====
!Tel_Top = (sintegral(Tp-TGa, 'Electrode_Top', 'Electrode_Top')/sintegral(1,
'Electrode_Top', 'Electrode_Top'))
Tel_Top = (sintegral(Tp, 'Electrode_Top', 'Electrode_Top')/sintegral(1,
'Electrode_Top', 'Electrode_Top'))
Tel_Bottom = (sintegral(Tp, 'Electrode_Bottom', 'Electrode_Bottom')/sintegral(1,
'Electrode_Bottom', 'Electrode_Bottom'))
Tmp=(sintegral(Tp, 'Microplate', 'Microplate')/sintegral(1, 'Microplate',
'Microplate'))

```

$T_{pe} = (\text{integral}(T_p, \text{'Piezoelement'}, \text{'Piezoelement'}) / \text{integral}(1, \text{'Piezoelement'}, \text{'Piezoelement'}))$

$T_{tr} = (\text{integral}(T_p, \text{'Thermoresistor Top'}, \text{'Thermoresistor Top'}) / \text{integral}(1, \text{'Thermoresistor Top'}, \text{'Thermoresistor Top'}))$

$T_{electr_Top} = T_{el_Top} - 273$

$T_{electr_Bottom} = T_{el_Bottom} - 273$

$T_{piezo} = T_{pe} - 273$

$T_{mplate} = T_{mp} - 273$

$T_{tres1} = T_{tr} - 273$

$T_{krt} = T_p - 273$

!=====Termoregulator=====

$R_{1d} = 430$ $R_{2d} = 2000$ $R_e = 4300$ $R_n = 25$!30 Om

$U_k = 11.3$ $U_{st} = 8$ $E_{op} = 4$ $U_{be} = 0.65$!Volt

$K_{ou} = 66$!koeficient of operation amplifier

$m_1 = R_{2d} / (R_{1d} + R_{2d})$

$R_t = 0.095 * \exp(3750 / T_{tr})$! $R_t = 34000$ pri 293K

$U_{min} = 0.05$ $U_{max} = 5$! 5.6 ! at OPA output ! $U = 6$

$U_{tr} = ((U_{st} * R_t) / (R_e + R_t) - E_{op}) * K_{ou} * m_1 - U_{be}$

$U = \text{IF } U_{tr} > U_{max} \text{ THEN } U_{max} \text{ ELSE IF } U_{tr} < U_{min} \text{ THEN } U_{min} \text{ ELSE } U_{tr}$

!Voltage on transistor emitter

$P_{pe} = (U * U) / R_n$

$P_{mp} = (U_k - U) * U / R_n$

$I_{pe} = P_{pe} / 11.3$

$I_{mp} = P_{mp} / 11.3$

!=====Frequency=====

$A_{tchh} = -4.6e-9$

$F_0 = 1e7$

$F = A_{tchh} * F_0 * (T_z - T_{el_Top})^2$

!=====

INITIAL VALUES

$$T_p = T_u$$

EQUATIONS

$\text{div}(qt) + Q + Q_{iz} = c \cdot \rho_l \cdot dt(T_p - T_u)$ { the heat equation } {divergencia vektora temperaturi po osiam X,Y,Z}

EXTRUSION

SURFACE "KRT Case Bottom In"	Z=-2.5e-3 !Z=-2.5e-3
LAYER "Vac Air Bottom Brackets"	
SURFACE "Tranz Bottom"	Z=-1.4e-3
LAYER "Tranz and Brackets"	
SURFACE "Microplate Bottom"	Z=-1.25e-3
LAYER "Microplate Bottom In"	
SURFACE "Microplate Bottom In"	Z=-1.20e-3
LAYER "Microplate"	
SURFACE "Microplate Top In"	Z=-1.05e-3
LAYER "Microplate Top In"	
SURFACE "Microplate Top"	Z=-1.0e-3
LAYER "Vac Air and Brackets PE"	
SURFACE "Electrode Piezoelement Bottom"	Z=-0.3e-3 !Z=-0.2504
LAYER "Electrode Piezoelement Bottom"	
SURFACE "Piezoelement Bottom"	Z=-0.25e-3
LAYER "Piezoelement Bottom"	
SURFACE "Piezoelement Bottom In"	Z=-0.20e-3
LAYER "Piezoelement"	
SURFACE "Piezoelement Top In"	Z=0.20e-3
LAYER "Piezoelement Top"	
SURFACE "Piezoelement Top"	Z=0.25e-3
LAYER "Electrode Piezoelement Top"	
SURFACE "Electrode Piezoelement Top"	Z=0.3e-3 !Z=0.2504
LAYER "Thermoresistor Vac Air Top"	
SURFACE "Thermoresistor Vac Air Top"	Z=0.55e-3

LAYER "Vac Air Top"

SURFACE "KRT Case Top In"

Z=1.5e-3

BOUNDARIES

SURFACE "KRT Case Bottom In" value (Tp) = Tu

SURFACE "KRT Case Top In" value (Tp) = Tu

REGION 1'internal Vacuum Air'

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Vac Air Bottom Brackets"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Tranz and Brackets"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Microplate Bottom In"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Microplate"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Microplate Top In"

LAYER "Vac Air and Brackets PE"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Electrode Piezoelement Bottom"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Piezoelement Bottom"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Piezoelement"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Piezoelement Top"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Electrode Piezoelement Top"

Kx=Kv Ky=Kv Kz=Kv C=Cv Pl=PLv !Vacuum Air

LAYER "Thermoresistor Vac Air Top"

$K_x=K_v$ $K_y=K_v$ $K_z=K_v$ $C=C_v$ $Pl=PL_v$!Vacuum Air

LAYER "Vac Air Top"

$K_x=K_v$ $K_y=K_v$ $K_z=K_v$ $C=C_v$ $Pl=PL_v$!Vacuum Air

start (-8e-3,-6e-3) value (Tp) =Tu line to(8e-3,-6e-3) to(8e-3,6e-3) to(-8e-3,6e-3)
line to finish

LIMITED REGION 'Microplate Bottom In' {Microplate}

LAYER "Microplate Bottom In"

$K_x=K_{pol}$ $K_y=K_{pol}$ $K_z=K_{pol}$ $c=C_{pol}$ $pl=PL_{pol}$ $N=0$!Polikor

$Q_{iz}=Q_{izmpk}$

start (-0.0065,-0.0045) line to(0.0065,-0.0045) to(0.0065,0.0045)
to(-0.0065,0.0045) line to finish

LIMITED REGION 'Microplate' {Microplate}

LAYER "Microplate"

$K_x=K_{pol}$ $K_y=K_{pol}$ $K_z=K_{pol}$ $c=C_{pol}$ $pl=PL_{pol}$ $N=0$!Polikor

start (-0.0065,-0.0045) line to(0.0065,-0.0045) to(0.0065,0.0045)
to(-0.0065,0.0045) line to finish

LIMITED REGION 'Microplate Top In' {Microplate}

LAYER "Microplate Top In"

$K_x=K_{pol}$ $K_y=K_{pol}$ $K_z=K_{pol}$ $c=C_{pol}$ $pl=PL_{pol}$ $N=0$!Polikor

$Q_{iz}=Q_{izmemp}$

start (-0.0065,-0.0045) line to(0.0065,-0.0045) to(0.0065,0.0045)
to(- 0.0065,0.0045) line to finish

LIMITED REGION 'Piezoelement Bottom' {Piezoelement}

LAYER "Piezoelement Bottom"

$K_x=K_{pex}$ $K_y=K_{pey}$ $K_z=K_{pez}$ $c=C_{crystal}$ $pl=PL_{crystal}$ $N=0$!Crystal

$Q_{iz}=Q_{izpemp}+Q_{iztranz}$

start (0,-3.5e-3) line to(4e-3,-3.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (5e-3,-2.5e-3)
line to(5e-3,2.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (4e-3,3.5e-3) line to (-4e-3,3.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-5e-3,2.5e-3) line to (-5e-3,-2.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-4e-3,-3.5e-3) line to(-3e-3,-3.5e-3) to finish

LIMITED REGION 'Piezoelement' {Piezoelement}

LAYER "Piezoelement"

Kx=Kpex Ky=Kpey Kz=Kpez c=Ccrystal pl=PLcrystal N=0!Crystal

start (0,-3.5e-3) !OK

line to(4e-3,-3.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (5e-3,-2.5e-3)

line to(5e-3,2.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (4e-3,3.5e-3) line to (-4e-3,3.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-5e-3,2.5e-3) line to (-5e-3,-2.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-4e-3,-3.5e-3) line to(-3e-3,-3.5e-3) to finish

LIMITED REGION 'Piezoelement Top' {Piezoelement}

LAYER "Piezoelement Top"

Kx=Kpex Ky=Kpey Kz=Kpez c=Ccrystal pl=PLcrystal N=0!Crystal

Qiz=Qizpete

start (0,-3.5e-3) line to(4e-3,-3.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (5e-3,-2.5e-3)

line to(5e-3,2.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (4e-3,3.5e-3) line to (-4e-3,3.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-5e-3,2.5e-3) line to (-5e-3,-2.5e-3)

arc (radius = 1e-3) to (-4e-3,-3.5e-3) line to(-3e-3,-3.5e-3) to finish

LIMITED REGION 'MP Brackets'

LAYER "Vac Air Bottom Brackets"

Kx=Knich Ky=Knich Kz=0.34*Knich C=3*Cnich Pl=3*Plnich N=0

LAYER "Tranz and Brackets"

Kx=Knich Ky=Knich Kz=0.34*Knich C=3*Cnich Pl=3*Plnich N=0

{Brackets}

start(-6.0e-3,-2.5e-3) arc (center=-6.0e-3,-2.35e-3) angle=360 to finish

start(6.0e-3,-2.5e-3) arc (center=6.0e-3,-2.35e-3) angle=360 to finish

start(-6.0e-3,2.5e-3) arc (center=-6.0e-3,2.35e-3) angle=360 to finish

start(6.0e-3,2.5e-3) arc (center=6.0e-3,2.35e-3) angle=360 to finish

LIMITED REGION 'Pinouts'

LAYER "Vac Air Bottom Brackets"

Kx=Kcon Ky=Kcon Kz=0.5*Kcon C=2*Ccon Pl=2*Plcon ! Constantan
 LAYER "Tranz and Brackets"

{Pinouts}

Kx=Kcon Ky=Kcon Kz=0.5*Kcon C=2*Ccon Pl=2*Plcon ! Constantan
 start(-3.25e-3,-4.3e-3) arc (center=-3.25e-3,-4.2e-3) angle=360 to finish
 start(0,-4.3e-3) arc (center=0,-4.2e-3) angle=360 to finish
 start(1.75e-3,-4.3e-3) arc (center=1.75e-3,-4.2e-3) angle=360 to finish
 start(3.5e-3,-4.3e-3) arc (center=3.5e-3,-4.2e-3) angle=360 to finish
 start(5.5e-3,-4.3e-3) arc (center=5.5e-3,-4.2e-3) angle=360 to finish

LIMITED REGION 'Transistor'

LAYER "Tranz and Brackets" {Transistor}

Kx=Kkr Ky=Kkr Kz=Kkr c=Ckr pl=PLkr N=0! Kremniy
 V=Vnagrmp !Vnagrmp=0.0025*0.0025*0.0001
 P=Pmp

start (-1.25e-3,-1.25e-3) line to(1.25e-3,-1.25e-3) to(1.25e-3,1.25e-3)
 to(-1.25e-3, 1.25e-3) to finish

LIMITED REGION 'Electrode Piezoelement Bottom'

Kx=0.004*Kel Ky=0.004*Kel Kz=250*Kel c=0.004*Cel pl=0.004*PLel N=0
 !Electrode
 P=0

LAYER "Electrode Piezoelement Bottom"

!'Contact_Agat_1'

start(-3.5e-3,-2e-3) line to (-5e-3,-2e-3) to (-5e-3,-2.5e-3) arc (radius = 1e-3)
 to (-4e-3,-3.5e-3) line to (-3.5e-3,-3.5e-3) to finish

!'Contact_Agat_2'

start(3.5e-3,2e-3) line to (5e-3,2e-3) to (5e-3,2.5e-3) arc (radius = 1e-3)
 to (4e-3,3.5e-3) line to (3.5e-3,3.5e-3) to finish

!'Connector_Agat_1'

start (-3.5e-3,3.5e-3) line to (-4e-3,3.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (-5e-3,2.5e-3)
 line to (-5e-3,2e-3) to (-3.5e-3,2e-3) to (-2e-3,1e-3) to (-2e-3,-2e-3)

```

to (2e-3,-2e-3) to (2e-3,2e-3) to (-2e-3,2e-3) to (-3.5e-3,3e-3) to finish
!'BracketPE'
start(0.0043,-0.00315) arc (center=0.0043,-0.003) angle=360 to finish
LIMITED REGION 'Electrode Piezoelement Top'
LAYER "Electrode Piezoelement Top"
Kx=0.004*Kel Ky=0.004*Kel Kz=250*Kel c=0.004*Cel pl=0.004*PLel N=0
!Electrode
!'Contact_Agat_1'
start(3.5e-3,2e-3) line to (5e-3,2e-3) to (5e-3,2.5e-3) arc (radius = 1e-3)
to (4e-3,3.5e-3) line to (3.5e-3,3.5e-3) to finish
!'Contact_Agat_2'
start(-3.5e-3,-2e-3) line to (-5e-3,-2e-3) to (-5e-3,-2.5e-3) arc (radius = 1e-3)
to (-4e-3,-3.5e-3) line to (-3.5e-3,-3.5e-3) to finish
!'Connector_Agat_1'
start (3.5e-3,-3.5e-3) line to (4e-3,-3.5e-3) arc (radius = 1e-3) to (5e-3,-2.5e-3)
line to(5e-3,-2e-3) to(3.5e-3,-2e-3) to(2e-3,-1e-3) to(2e-3,2e-3) to(-2e-3,2e-3)
to(-2e-3,-2e-3) to(2e-3,-2e-3) to(3.5e-3,-3e-3) to finish
!'Thermoresistor_Agat_1'
start (2.0e-3,-3.0e-3) line to (2.5e-3,-3.0e-3) to (2.5e-3,-3.5e-3) to (2.0e-3,-3.5e-3)
to finish
LIMITED REGION 'Electrode_Top' ! {Electrode Piezoelement Top}
LAYER "Electrode Piezoelement Top"
!'Electrode_Agat_1'
Kx=0.004*Kel Ky=0.004*Kel Kz=250*Kel c=0.004*Cel pl=0.004*PLel N=0
!Electrode
start (-2e-3,-2e-3) line to(-2e-3,2e-3) to(2e-3,2e-3) to(2e-3,-2e-3) to finish
LIMITED REGION 'Electrode_Bottom' ! {Electrode Piezoelement Top}
LAYER "Electrode Piezoelement Bottom"
!'Electrode_Agat_1'
Kx=0.004*Kel Ky=0.004*Kel Kz=250*Kel c=0.004*Cel pl=0.004*PLel

```

N=0 !Electrode

start (-2e-3,-2e-3) line to(-2e-3,2e-3) to(2e-3,2e-3) to(2e-3,-2e-3) to finish
 {LIMITED REGION 'Thermoresistor_Agat_1' ! {Electrode Piezoelement Top}
 LAYER "Electrode Piezoelement Top"

!'Thermoresistor_Agat_1'

Kx=Kel Ky=Kel Kz=Kel c=Cel pl=PLel N=0!Electrode

P=0

start (2.0e-3,-3.0e-3) line to (2.5e-3,-3.0e-3) to (2.5e-3,-3.5e-3) to (2.0e-3,-3.5e-3)
 to finish}

LIMITED REGION 'Heater Piezoelement Top'

LAYER "Electrode Piezoelement Top"

Kx=0.01*Knich Ky=0.01*Knich Kz=100*Knich c=0.01*0.67*Cnich

pl=0.01*0.67*PLnich N=0 !Nichrom heater

!'Heater_Agat_Top'

V=Vnagrpe

P=0.01*Ppe/2

start (3.5e-3,3.3e-3) line to(-2.2e-3,3.3e-3) to(-4.8e-3,0.7e-3) to(-4.8e-3,-2e-3)
 to(-4.2e-3,-2e-3) to(-4.2e-3,0.5e-3) to(-2e-3,2.7e-3) to(3.5e-3,2.7e-3) to finish

LIMITED REGION 'Piezzoelement Brackets'

LAYER "Vac Air and Brackets PE"

Kx=Kni Ky=Kni Kz=Kni c=Cni pl=PLni N=1 !Nikel

start(-0.0043,-0.00315) arc (center=-0.0043,-0.003) angle=360 to finish

start(0.0043,-0.00315) arc (center=0.0043,-0.003) angle=360 to finish

start(-0.0043,0.00315) arc (center=-0.0043,0.003) angle=360 to finish

start(0.0043,0.00315) arc (center=0.0043,0.003) angle=360 to finish

LIMITED REGION 'Heater Piezoelement Bottom'

LAYER "Electrode Piezoelement Bottom"

Kx=0.01*Knich Ky=0.01*Knich Kz=100*Knich c=0.01*0.67*Cnich

pl=0.01*0.67*PLnich N=0 !Nichrom heater

!'Heater_Agat_Bottom'

$V=V_{nagrpe}$

$P=0.01 * P_{pe}/2$

start (-3.5e-3,-3.3e-3) line to (2.2e-3,-3.3e-3) to (4.8e-3,-0.7e-3) to (4.8e-3,2e-3)
to (4.2e-3,2e-3) to (4.2e-3,-0.5e-3) to (2e-3,-2.7e-3) to (-3.5e-3,-2.7e-3) to finish

LIMITED REGION 'Thermoresistor Top'

LAYER "Thermoresistor Vac Air Top"

$K_x=K_{tr}$ $K_y=K_{tr}$ $K_z=K_{tr}$ $c=C_{kr}$ $pl=PL_{kr}$ $N=0$!Termoresisor

start (2.0e-3,-3.0e-3) line to (2.5e-3,-3.0e-3) to (2.5e-3,-3.5e-3) to (2.0e-3,-3.5e-3)
to finish

!=====

TIME 0 to Tend

MONITORS

for cycle=1

contour(Tkrt) on $z=0.25e-3$ as "Piezoelement Temperature Gradients" contours = 25
range=(25,95)

contour(Tkrt) on $z=0.25e-3$ zoom (-0.0048, -0.0048, 0.0096,0.0096) as
"Piezoelement Temperature Gradients" contours = 200 !contours = 200

contour(Tkrt) on $z=-0.25e-3$ zoom (-0.0048, -0.0048, 0.0096,0.0096) as
"Piezoelement Temperature Gradients" contours = 200

contour(Tkrt) on $z=0$ zoom (-0.0048, -0.0048, 0.0096,0.0096) as "Piezoelement
Temperature Gradients" contours = 200

contour(Tkrt) on $z=0.25e-3$ zoom (-0.00195, -0.00195, 0.0039,0.0039) as "Electrode
Temperature Gradients" contours = 30

contour(Tkrt) on $z=-1.25e-3$ zoom (-0.00648, -0.00648, 0.01296,0.01296) as "MP
Temperature Gradients" contours = 30

contour(Tkrt) on $y=0$ as "XZ Temperature Field" contours = 25 !range=(65,75)

contour(Tkrt) on $y=-2.35e-3$ as "XZ Temperature Field" contours = 25
range=(65,75)

contour(Tkrt) on $y=-0.003$ as "XZ Temperature Field" contours = 25 !range=(65,75)

PLOTS

```
for t = endtime ! for t = 3 to 4
surface(Tkrt) on z=0.25e-3 zoom (-0.002, -0.002, 0.004,0.004) as "Electrode
Temperature Gradients" contours = 35
surface (Ga) on z=1.0e-3 zoom (-0.002, -0.002, 0.004,0.004)
surface (Ga) on z=1.0e-3 zoom (-0.0035, -0.0035, 0.007,0.007)
HISTORIES
history(Tkrt) at (0,0,-0.25e-3) (0,-3e-3,-0.25e-3) (0,0,-1.25e-3) (-4.5e-3,0,0.25e-3)
{PE center, PE heater, MP center/bottom}
history (Telectr_Top, Telectr_Bottom, Tpiezo, Tmplate, Ttres1) !, Ttres2)
history (U)
history (Rt)
history (Ppe,Pmp)
history (Tzc-Telectr_Top, Tzc-Telectr_Bottom) FIXED range = (-5, 15)
history (F)
history (Ga)
END
```

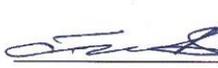
Приложение В

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «ОНИИП»

 В.А. Березовский

«28» 06 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Карагузова В.И. «Уменьшение времени установления частоты прецизионных термостатированных кварцевых генераторов»

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель начальника НТК-7 по научной работе Яковлев А.Н., начальник НТК-7 Чукавов Е.А. и заместитель генерального директора по НИОКР АО «ОНИИП» Давыдович А.В. составили настоящий акт о том, что в период с 2014 по 2018 результаты диссертационной работы Карагузова Виктора Ивановича использованы при выполнении ОКР «Разработка опорного кварцевого генератора» и внедрены в производство НТК-7 АО «ОНИИП» в кварцевом генераторе М32021 УИЯД.433532.031.

Применение данных генераторов позволило снизить время выхода на режим радиотехнических систем, разрабатываемых оборонно-промышленным комплексом.

Председатель комиссии:

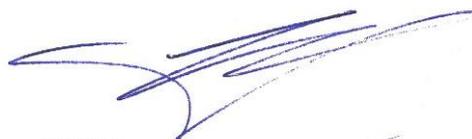
Заместитель генерального директора
по НИОКР АО «ОНИИП»



А.В. Давыдович

Члены комиссии:

Начальник НТК-7



Е.А. Чукавов

Заместитель начальника НТК-7
по научной работе



А.Н. Яковлев