

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ С КОМПОЗИТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ-ТЕРМОСТАТОМ

Рассматривается перспективная конструкция термостатированного кварцевого генератора с резонатором-термостатом. С целью изучения влияния замены материала микроплаты в резонаторе-термостате на работу генератора исследуются процессы установления стационарного температурного режима после включения. Материал новой микроплаты соответствует технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Обнаружено неприемлемое изменение характера установления стационарного режима. Для решения обнаруженной проблемы предлагается изменение конструкции.

**Ключевые слова:** термостатированный кварцевый генератор, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика, кварцевый резонатор-термостат, терморегулятор, тепловая модель генератора, процесс установления температуры.

**Введение.** Основными параметрами кварцевых генераторов являются стабильность частоты (температурная, долговременная и кратковременная), габариты, потребляемая мощность и время выхода на заданный режим после включения. Эти параметры во многом противоречивые, и одновременное их выполнение является сложной технической задачей. Для достижения высокой стабильности частоты в интервале температур широко используются термостатированные кварцевые генераторы. Для снижения габаритов и потребляемой мощности в таких генераторах для нагрева пьезоэлемента часто используют резистивную пленку, нанесенную на периферию непосредственно пьезокварцевой пластины [1, 2]. Такое решение обеспечивает высокую эффективность нагрева пьезоэлектрической пластины, однако приводит к возникновению температурных градиентов по ее поверхности и снижению стабильности частоты.

Лучшую равномерность прогрева пьезопластины и стабильность частоты обеспечивают кварцевые резонаторы-термостаты (КРТ) с комбинированным нагревом, при котором часть тепла на пластину передается через нагревательную пленку, а часть — через нагрев управляющего транзистора, включенного последовательно с пленкой на изолирующем основании (микроплате, размещенной с пьезокварцевой пластиной в одном объеме), обычно изготовленном из «поликора» (вакуумплотной корундовой керамики) [3]. Такое решение обеспечивает более высокий КПД системы нагрева, так как мощность, рассеиваемая на управляющем транзисторе, остается внутри нагреваемого объема. Резонаторам-термостатам с комбинированным нагревом посвящено большое число работ [3–7]. Используя принцип

комбинированного нагрева, удалось создать кварцевые генераторы с очень хорошим соотношением «стабильность частоты / потребляемая мощность» [8].

Кроме температурной стабильности частоты, большое значение имеет и долговременная стабильность, характеризующая способность генератора сохранять свои параметры в течение длительного срока. Исследования [9] показали, что применение в резонаторе-термостате микроплаты, изготовленной по технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (ЛТСС), приводит к улучшению параметра долговременной нестабильности частоты термостатированного кварцевого генератора (ТСКГ) в 4 раза по сравнению с исходной конструкцией ТСКГ с микроплатой из поликора. Применяемая конструкция КРТ в ТСКГ перспективна для космического применения [10, 11]. Согласно высказанной в [9] гипотезы, улучшение долговременной стабильности частоты кварцевого генератора при применении микроплаты, изготовленной по технологии ЛТСС, произошло благодаря замене паяльных соединений на клеевые и отсутствию процесса осаждения микрочастиц на пьезоэлемент в конструкции с ЛТСС-микроплатой. Возможно, также обнаружена способность данного керамического материала к газопоглощению и материал ЛТСС выступил в роли геттера при вакуумировании кварцевого резонатора-термостата. Вместе с тем изменение материала конструкции резонатора могло привести к изменению его тепловых характеристик и ухудшить качество процесса установления частоты. Потребовалось проведение дополнительных исследований, в результате которых было предложено сделать существенное изменение конструкции.

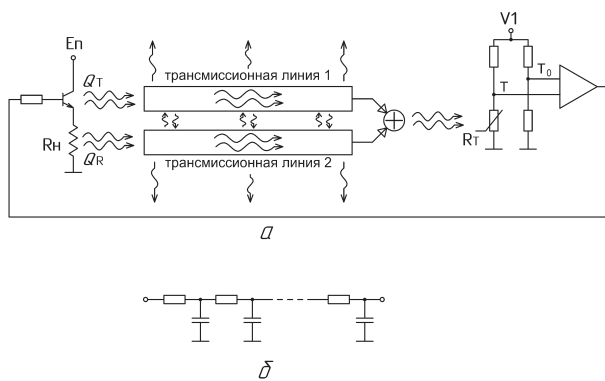


Рис. 1. Тепловая модель резонатора-термостата с двумя нагревателями: транзистором и плёночным резистором в электрической цепи эмиттера транзистора

### 1. Тепловая модель резонатора-термостата и ее анализ.

В рассматриваемой конструкции резонатора-термостата тепло от нагревателей к пьезоэлементу распространяется несколькими путями. Наиболее влияющими являются: путь распространения тепла по поверхности пьезоэлемента от нагревательной резистивной пленки, наносимой по краю пьезоэлемента, к его центру, температура которого наиболее сильно влияет на частоту генерируемого сигнала, и путь распространения тепла от мощного транзистора опять же к центру пьезоэлемента, но уже более длинным путем — через микроплату и держатели пьезоэлемента. Распространение тепла от нагревателей осуществляется по распределённым линиям теплопереноса. С электрической точки зрения, резонатор-термостат представляет собой замкнутую систему регулирования, стабилизирующую температуру термодатчика, расположенного на пластине пьезоэлемента (но не в его центре, так как размещение термодатчика в центре акустических колебаний приведет к существенному ухудшению добротности и стабильности колебаний). Схема такого регулятора может быть упрощенно изображена в виде модели (рис. 1). Данная модель учитывает как электрические процессы перераспределения мощностей в нагревателях (транзисторе и пленке), так и инерционные процессы распространения тепла различными путями от нагревателей к терморезистору (именно его температура стабилизируется). В первом приближении путь распространения тепла может быть представлен в виде трансмиссионной линии (рис. 1а). Параметры трансмиссионной линии зависят от материалов конструкции на пути переноса тепла, конструкции изделия и, в общем случае, являются неоднородными (меняются вдоль линии теплопереноса). В самом упрощенном случае линия может быть представлена распределенной RC-цепочкой (рис. 1б).

Попытка аппроксимировать передаточные функции трансмиссионных линий аналитическими функциями и дальнейшего решения дифференциальных уравнений процесса установления температуры в схеме терморегулятора приведет к существенным погрешностям результата из-за сложности установления зависимости между параметрами конструкции и эквивалентной электрической схемы трансмиссионной линии. Более точные результаты могут быть получены при тепловом моделировании процессов на сеточной модели с использованием одной из программ решения дифференциальных уравне-

ний в частных производных методом конечных элементов. Использовался пакет FlexPDE 4.0.7 [12].

Построенная модель имеет более 300000 конечных элементов, что указывает на её сложность.

**Ограничения модели.** Отсутствие внутри термокамеры газов и жидкостей практически исключает внутренние процессы конвекции. В стационарном режиме разность температур пьезоэлемента и микроплаты близка к нулю, поэтому влиянием процессов излучения между ними также можно пренебречь. Таким образом, основным процессом переноса тепла внутри КРТ является теплопроводность (кондукция). Снаружи корпуса ТСКГ унос тепла от поверхности корпуса происходит в основном с помощью конвекции. Внутри корпуса ТСКГ между внутренними стенками корпуса и термокамерой КРТ перенос тепла осуществляется в основном кондукцией и частично конвекцией с излучением.

Основное теплофизическое уравнение (уравнение теплопроводности Фурье):

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}(T_p) \cdot \lambda) + \Sigma Q_i = c \cdot \rho l \cdot dt(T_p - T_u),$$

где  $\Sigma Q_i$  — плотности тепловыделения от источников тепла в объёме  $V_i$  с тепловой мощностью  $P_i$  и выражаются через отношения  $P_i/V_i$ , Вт/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  — удельная теплопроводность, Вт/(м·К);

$c$  — удельная теплоемкость вещества, Дж/кг·К;

$\rho l$  — плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;

$dt(T_p - T_u)$  — дифференциал разности температур;

$T_u$  — температура внешней окружающей среды;

$T_p$  — температура в конечном сеточном элементе конструкции.

В программе были применены граничные условия Неймана по границе описания трёхмерной модели. Начальные условия: постоянная температура всех элементов конструкции равна температуре окружающей среды.

На рис. 2 показаны результаты моделирования процесса изменения температуры в центре пьезопластины и в центре микроплаты. Слева, на рис. 2а, графики для КРТ с микроплатой из материала «поликор», справа, на рис. 2б, графики для КРТ с микроплатой из материала LTCC. Менялся только материал микроплаты (заменой физических параметров материала), а вся конфигурация резонатора-термостата и размеры оставались неизменными.

Графики справа показывают, что процесс установления температуры стал носить колебательный характер, изменилась разность температур между пьезоэлементом и микроплатой, время установления температуры увеличилось.

**2. Решение проблемы.** Моделирование процессов установления температуры при незначительном изменении размеров элементов конструкции резонатора-термостата (размеры микроплаты, диаметры держателей и др.) не выявили существенного влияния этих изменений на характер переходного процесса установления температуры.

Было сделано предположение, что качественное изменение характера переходного процесса, в первую очередь, определяется различиями теплофизических свойств используемых материалов. Теплофизические константы материалов LTCC и поликор имеют сильные различия, особенно по величине коэффициента теплопроводности. Данные физических констант используемых материалов приведены в табл. 1.

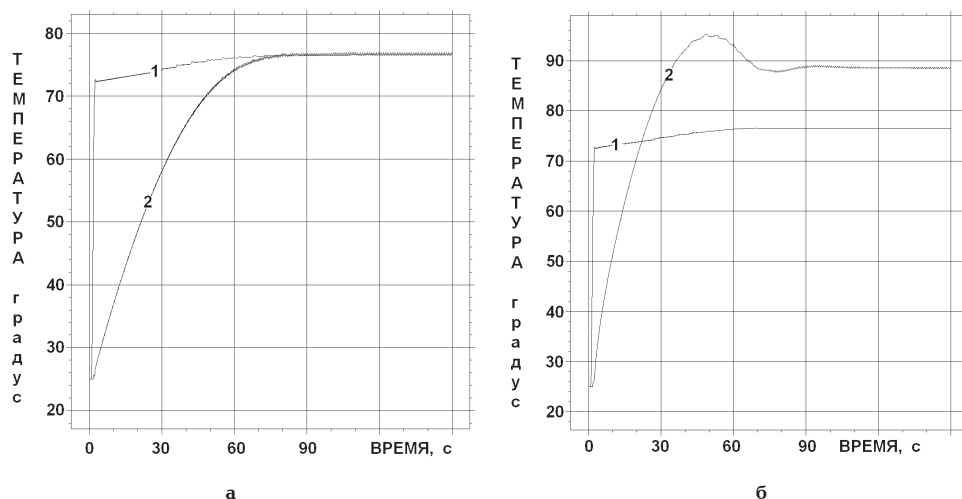


Рис. 2. Графики изменения температуры в центре пьезоэлемента и в центре микроплаты для: а — КРТ с микроплатой из материала поликор; б — КРТ с микроплатой из материала LTCC; 1 — график изменения температуры в пьезопластине; 2 — в микроплате

На этом основании была выдвинута гипотеза: большое тепловое сопротивление между транзистором нагревателя на микроплате из LTCC и местами крепления проволочных кварцедержателей на этой плате, имеющей сравнимую теплоёмкость в обоих вариантах микроплаты, вызывает повышенную инерционность процесса установления температуры, что приводит к колебательному характеру установления.

Сокращение времени распространения тепла от транзистора по микроплате к кварцедержателям может быть достигнуто не только за счет изменения тепловых констант платы, но и за счет сокращения пути распространения тепла. Из соображения симметрии тепловых потоков в исходной конструкции транзистор-нагреватель размещен в центре микроплаты. Сокращение пути распространения тепла при сохранении симметричности может быть достигнуто путем использования двух (и более) транзисторов-нагревателей, смещенных от центра пластины к кварцедержателям. Для этого необходимо модифицировать схему терморегулятора. Вместо одного транзистора можно применить два идентичных параллельно включенных по всем выводам транзистора VT1 и VT2 того же наименования. Модифицированная схема терморегулятора показана на рис. 3

Модель передачи тепла к пьезопластине через держатели от транзистора на микроплате резонатора-термостата показана на рис. 4. Модель с двумя транзисторами-нагревателями показана справа (рис. 4б). Видно, что длина линии переноса тепла к

Таблица 1

Физические константы материалов

Материал	Поликор	LTCC
Теплопроводность, Вт/(м·К)	40	3
Теплоёмкость, Дж/(кг·К)	840	775
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3960	3086

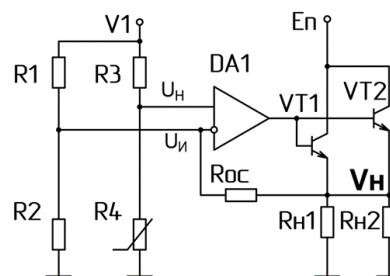


Рис. 3. Модифицированная схема терморегулятора

держателям по микроплате сокращена (T2 вместо T1).

Напылённые на пьезопластину резонатора нагревательные элементы конструктивно разделены на две части (в обоих вариантах ТСКГ), их роль в схеме терморегулятора выполняют сопротивле-

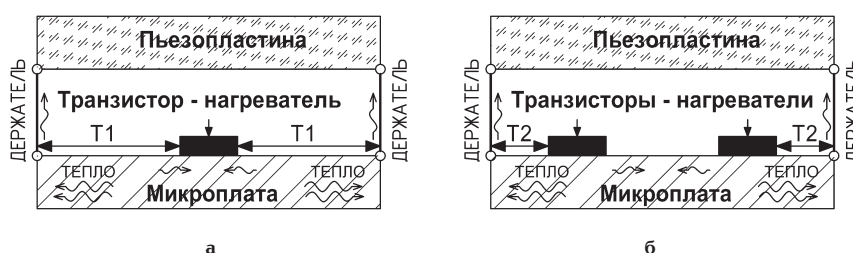


Рис. 4. Модель передачи тепла к пьезопластине через держатели от транзистора на микроплате: а — один транзистор; б — два транзистора

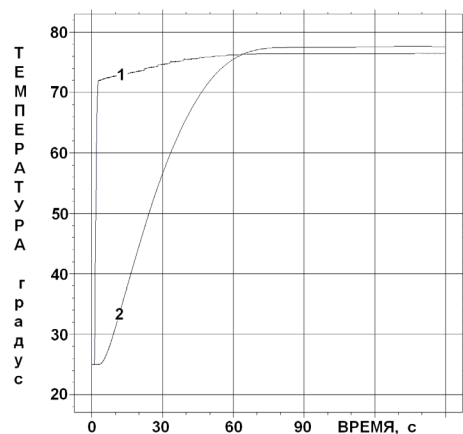


Рис. 5. Графики изменения температуры в центре пьезоэлемента (1) и в центре микроплаты (2) для КРТ с микроплатой из материала LTCC и модифицированной схемой терморегулятора

ния Rn1 и Rn2 (рис. 3). В результате размещения двух транзисторов-нагревателей вместо одного характер установления температуры поменялся, как показано на рис. 5.

**3. Результаты.** Сравнение графиков на рис. 2б и рис. 5 показывает, что применение модифицированной схемы терморегулятора той же мощности, но с двумя транзисторами, привело к качественному изменению процесса установления температуры: отсутствует колебательность переходной характеристики, уменьшилась разность температур между кварцевым пьезоэлементом и микроплатой из материала LTCC. Характер переходного процесса стал близок к процессу установления температуры в исходном ТСКГ с КРТ с микроплатой из материала поликор (рис. 2а).

Распределение тепловых полей в модели конструкции ТСКГ на одном из сечений показано на рис. 6.

**Заключение.** Построенная трёхмерная модель ТСКГ с КРТ и проведённое моделирование показало изменение времени установления теплового стационарного режима в ТСКГ при простой замене материала микроплаты в КРТ с поликора на керамику LTCC.

В процессе поиска решений задачи по уменьшению времени установления тепловых стационарных условий работы ТСКГ на основе анализа температуропроводности элементов генератора было решено модифицировать схему терморегулятора с внесением изменений в конструкцию: замена одного транзистора на два с размещением их между парами проволочных кварцедержателей. Таким образом, удалось уменьшить время установления температур в ТСКГ с КРТ с микроплатой из керамики LTCC, и характер переходного процесса стал близок к процессу установления температуры в исходном ТСКГ с КРТ с микроплатой из материала поликор. А использование LTCC улучшает долговременную стабильность частоты генерируемого колебания.

#### Библиографический список

1. Tinta F. G., Matistic A. S., Lagasse G. A. The direct temperature control of quartz crystals in evacuated enclosures // 24th Annual Symposium on Frequency Control, April 27–29, 1970. Atlantic City, 1970. P. 157–167.

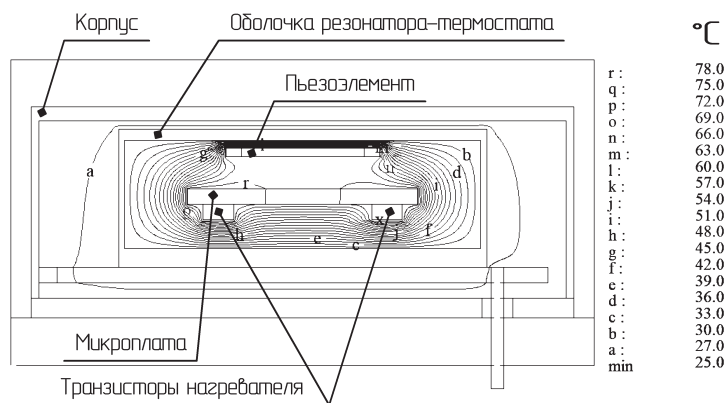


Рис. 6. Распределение температур в сечении конструкции ТСКГ с терморегулятором на двух транзисторах

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

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

4. Abramson I. OCXO Design Using Composite-Heating of the Crystal Resonators // Proc. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control conf. 1994. Vol. 41, no. 2. P. 284–289.

5. Abramzon I., Tapkov V., Kornilov A. Extraordinary OCXO solutions based on the IHR technology // IEEE International Frequency Control Symposium, July 09–13 2017. Besancon, France, 2017. 5 p. DOI: 10.1109/FCS.2017.8088852.

6. Abramzon I., Boroditsky R., Cocuzzi D. A. Miniature OCXO Using DHR Technology // Proc. IEEE Annual Frequency Control Symposium, May 28–30, 1997. Orlando, 1997. P. 943–946.

7. Пат. 2236746 Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/08. Кварцевый резонатор-термостат / Куталёв А. И. № 2003100159; заявл. 04.01.03; опубл. 20.09.04, Бюл. № 26.

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

9. Карагусов В. И., Еромоленко С. В., Ярош А. М. [и др.]. Применение LTCC-керамики в конструкции кварцевого резонатора-термостата // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 1 (36). С. 121–126.

10. Ложников А. О., Карагусов В. И., Розанова А. В. Термостатированный кварцевый генератор 80–130 МГц для космического применения // Техника радиосвязи. 2019. № 4 (43). С. 86–93. DOI: 10.33286/2075-8693-2019-43-86-93.

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

12. Дорошина З. Н., Водолазская И. В. Применение пакета FlexPDE в образовательной и научной деятельности // Физическое образование в вузах. 2018. Т. 24, № 3. С. 74–83.

**ХОМЕНКО Игорь Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.  
SPIN-код: 7226-8420

ORCID: 0000-0002-1870-3957  
AuthorID (SCOPUS): 15519442000  
ResearcherID: I-9699-2014

Адрес для переписки: hiv\_hi@mail.ru, ivkhomenko@omgtu.ru

**КОСЫХ Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код (РИНЦ): 2971-4057

AuthorID (SCOPUS): 6701547176

ORCID: 0000-0001-6705-4255

ResearcherID: G-5127-2013

Адрес для переписки: avkosykh@omgtu.ru

**КОМПАНЕЦ Екатерина Юрьевна**, студентка группы РТм-221 радиотехнического факультета ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: kompanec\_ekaterina@mail.ru

#### Для цитирования

Хоменко И. В., Косых А. В., Компанец Е. Ю. Оптимизация параметров источника опорной частоты с композитным резонатором-термостатом // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 91 – 95. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-91-95.

Статья поступила в редакцию 21.09.2022 г.

© И. В. Хоменко, А. В. Косых, Е. Ю. Компанец