

УДК 621.373.121.13

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.373.381

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ РАЗОГРЕВА КВАРЦЕВОГО ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА ТД-СРЕЗА

DETERMINING THE OPTIMAL WARM-UP POWER OF SC-CUT DIRECT HEATING PIEZOELEMENT

КАРАГУСОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ

KARAGUSOV VIKTOR I.

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»
644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231
Тел.: +7 (3812) 51-49-00, факс: +7 (3812) 77-90-75
info@oniip.ru

“Omsk Research Institute of Instrument-making” JSC
231 Maslennikov St., Omsk, 644009
Tel.: +7 (3812) 51-49-00, fax: +7 (3812) 77-90-75
info@oniip.ru.

Представлены результаты расчетов оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза с прямым термостатированием для уменьшения времени установления частоты прецизионного термостатированного кварцевого генератора путем расчета динамики теплового поля пьезоэлемента в режиме разогрева на основе пространственной численно-аналитической модели.

Ключевые слова: термостатированный кварцевый генератор; кварцевый резонатор-термостат; пьезоэлемент; время установления частоты.

The paper presents the calculations results of optimal warm-up power of SC-cut quartz crystal piezoelement with direct heating for reducing warm-up time of precision quartz crystal oscillators. The results have been achieved by calculating piezoelement thermal processes dynamics in warm-up mode on space thermal model.

Keywords: oven-controlled crystal oscillator; OCXO; direct heating resonator; frequency setting time.

Важной характеристикой для прецизионных термостатированных кварцевых генераторов (ТСКГ) является время его готовности при включении, то есть время установления частоты (ВУЧ), поскольку частота генерации зависит от температуры и необходимо определенное время для разогрева кварцевой пластины пьезоэлемента от температуры окружающей среды до температуры статирования, которое определяется мощностью разогрева, теплоемкостью (то есть объемом) пьезоэлемента (ПЭ), геометрическими размерами пластины и ограничивается удельной теплопроводностью кварца. Чем меньше объем кварцевого ПЭ, тем быстрее он разогревается, однако уменьшение объема без ухудшения стабильности частоты и добротности резонатора, а значит, и уровня шумов прецизионного ТСКГ невозможно.

Минимизация этого времени является актуальной задачей при конструировании опорных термостатированных кварцевых генераторов (ТСКГ), обеспечивающих лучшую долговременную

и температурную стабильность среди генераторов на основе пьезоэлектриков, так как зачастую они определяют время готовности радиоэлектронной системы к частотным или временным измерениям после ее включения. Время установления частоты зависит от множества конструктивно-физических факторов, и определяющим среди них является мощность начального разогрева кварцевого ПЭ.

Для достижения высокой стабильности частоты и низких шумовых характеристик обосновано применение прецизионных термостатированных кварцевых генераторов (ТСКГ) с выходной частотой, как правило, 10 МГц, в которых используется ПЭ двух-поворотного ТД-среза ($yx\bar{b}l/\varphi/\Theta$, $22^\circ \leq \varphi \leq 24^\circ$, $33,5^\circ \leq \Theta \leq 35^\circ$).

У ТСКГ, имеющих резонатор-термостат (РТ) с распределенным комбинированным подогревом (рис. 1), пьезоэлемент при включении быстро разогревается напыленным на него нагревателем (прямой подогрев), а в установившемся режиме подогрев

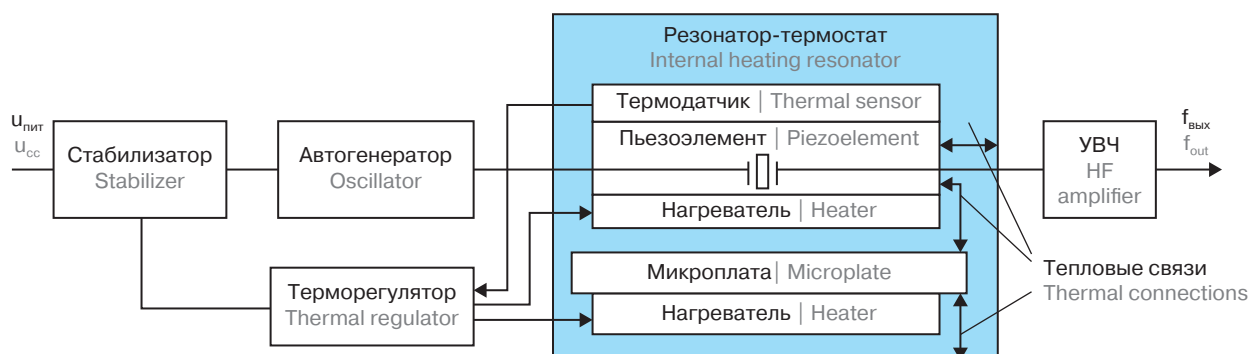


Рис. 1. Функциональная схема термостатированного кварцевого генератора с распределенным нагревателем пьезоэлемента

Fig. 1. Functional chart of oven-controlled crystal oscillator with distributed piezoelement heater



осуществляется нагревателем, размещенным на микроплате, посредством передачи тепловой энергии через держатели и тепловым излучением (косвенный подогрев). Такие РТ совмещают преимущества прямого и косвенного подогрева ПЭ, то есть имеют низкие значения шумовых характеристик и кратковременной нестабильности частоты (КНЧ), как у ТСКГ с косвенным подогревом ПЭ, и при этом имеют наименьшее время установления частоты, как ТСКГ с РТ с прямым подогревом ПЭ.

Применение резонаторов-термостатов с внутренним распределенным нагревателем пьезоэлемента позволило снизить время установления частоты термостатированных генераторов с нескольких минут до десятков секунд в диапазоне рабочих температур от -60°C до 70°C . Лучшие образцы имеют время готовности 30 с. Для дальнейшего снижения времени установления частоты прецизионных ТСКГ необходимо исследовать динамику тепловых процессов, протекающих в ПЭ при начальном разогреве напыленными на него нагревателями, оптимизировать конструкцию резонатора-термостата путем расчета динамики температурного поля пьезоэлемента на основе пространственной численно-аналитической модели. Расчеты на модели позволяют определить мощность начального разогрева, выделяемую на напыленном на ПЭ нагревателе и необходимую для достижения минимального времени установления частоты, с одной стороны, и приемлемую крутизну управляющей характеристики терморегулятора, обеспечивающую низкие значения кратковременной нестабильности частоты и спектральной плотности мощности фазовых шумов, с другой стороны.

Метод исследования в данной работе заключается в построении пространственной тепловой модели для конструкции ПЭ с прямым подогревом, расчете температурного поля на этой модели методом конечных элементов во временной области с момента включения до наступления установившегося режима и последующем анализе результатов расчета.

Существует метод расчета времени установления частоты при параметрах, определяемых конструкцией кварцевого резонатора-термостата (КРТ) и терморегулятором, управляющим мощностью

разогрева, описанный в [1] и выполненный в соответствии с [2]. В приведенной в [1] модели на основе электротепловой аналогии для упрощения расчетов считается, что температура ПЭ одинакова в каждой его точке, что не соответствует реальным тепловым процессам. В данной модели учитывается только теплоемкость ПЭ. Однако при разогреве скорость распространения тепла от нагревателя по объему ПЭ ограничена теплопроводностью кварца, температура в объеме ПЭ имеет выраженную неравномерность температурного поля, особенно в режиме разогрева, и может иметь локальные пиковые значения, способные нанести повреждения элементам конструкции. Следует отметить, что кварц, являясь анизотропным кристаллическим материалом, имеет разные значения теплопроводности по направлениям кристаллографических осей, что также необходимо учитывать при расчетах.

В настоящее время в научной литературе недостаточно освещен вопрос минимизации времени установления частоты с точки зрения динамики температурного поля ПЭ в режиме разогрева и определения минимально возможного времени установления частоты при расчете и конструировании ТСКГ с прямым и комбинированным подогревом с учетом всех влияющих факторов.

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 теплоемкости нужно говорить о минимизации времени разогрева ПЭ для каждого из типов ТСКГ. Рассмотрим актуальную проблему минимизации времени разогрева на примере прецизионного ТСКГ с распространенной номинальной частотой 10 МГц. На практике в прецизионных ТСКГ с прямым подогревом ПЭ с выходной частотой 10 МГц наиболее часто используются прямоугольные длиной 10 мм и шириной 7 мм и круглые ПЭ диаметром 10 мм, плосковыпуклого профиля с радиусом кривизны сферы, равным 300 мм, возбуждаемые на 3-й механической гармонике и изображенные на рис. 2: конструкция №1 (рис. 2а), конструкция №2 (рис. 2б).

INTRODUCTION

The readiness time of the precision oven-controlled quartz crystal oscillators (OCXO) at the moment of switch-on (or frequency setting time (FST)) is an important characteristic. The generation frequency depends on the temperature of the piezoelectric element (PE) and requires a certain time for warming up the piezoelectric quartz plate from the ambient temperature to the temperature of the thermal static, which is determined by the warm-up power, the heat capacity (i.e. volume) of the PE, the geometric dimensions of the plate, and is limited by the specific thermal conductivity of quartz. The smaller the volume of quartz PE, the faster it heats up, but the volume reduction without deterioration in the frequency stability and resonator quality-factor, and hence the phase noise level of precision OCXO is impossible.

Minimizing this time is an urgent task in the design of reference OCXO, providing better long-term and temperature stability among the generators based on piezoelectrics, as they often determine the readiness time of the electronic system to frequency or time measurements after system is switched on. The frequency setting time depends on a number of structural and physical factors, and the determining factor among them is the power of the initial heating of quartz PE.

Application of precision OCXO with an output frequency of typically 10 MHz with double-rotated SC-cut PE ($\gamma\text{xb1}/\varphi/\Theta$, $22^{\circ} \leq \varphi \leq 24^{\circ}$, $33,5^{\circ} \leq \Theta \leq 35^{\circ}$) is optimal for approaching high frequency stability and low phase noise level.

The OCXO with distributed internal heating resonator (IHR) intended for fast initial direct warm-up of piezoelement comprises a film heater evaporated on it and

a heater intended for the indirect warming-up in steady-state mode, which is disposed in microplate (MP) with PE mounted to it (Fig. 1).

OCXOs with this IHR combine the advantages of direct and indirect heating of PE, that is they have low phase noise level and Allan variation like OCXOs with PE indirect heating and thus have the least frequency setting time, like OCXOs with PE direct heating.

Application of IHR and distributed complex heating allowed decreasing OCXO's frequency setting time from few minutes to dozens of seconds in operating temperature range from -60°C to 70°C . The best samples have the FST equal to 15 seconds with the accuracy of $1 \cdot 10^{-7}$ and at the temperature of $+20^{\circ}\text{C}$ and 30 seconds at -60°C .

Further reducing the FST approaching to physical threshold is impossible without investigating thermal processes dynamics

Обе конструкции имеют геометрически замкнутые двусторонние напыленные нагреватели и крепятся при помощи четырех держателей.

ТСКГ с ПЭ представленных конструкций обеспечивают одинаково высокие характеристики, но величина теплоемкости пьезоэлементов конструкции № 2 незначительно больше, чем у конструкции № 1, и мощность начального разогрева также потребуется немного больше, поэтому для исследования выбран ПЭ конструкции № 1.

Для конструкции ПЭ № 1, изображенной на рис. 2а, построим пространственную тепловую модель, позволяющую рассчитать динамическое температурное поле. Непосредственное (прямое) термостатирование ПЭ осуществляется поддержанием температуры с помощью напыленного 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 должны быть учтены в модели. Принимая толщину пластины (по оси y) малой по сравнению с длиной и шириной (по осям x, z) для упрощения расчетов и считая температурную неоднородность по толщине незначительной, уравнение распространения тепла (дифференциальное уравнение теплообмена) в каждой точке кварцевой пластины ПЭ можно описать следующим выражением [3]:

$$\operatorname{div}(q) - 2Q_{\text{из}} - 2Q_{\text{ог}} + Q_n = c \cdot \rho \cdot dT/dt, \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока, описываемая вектором:

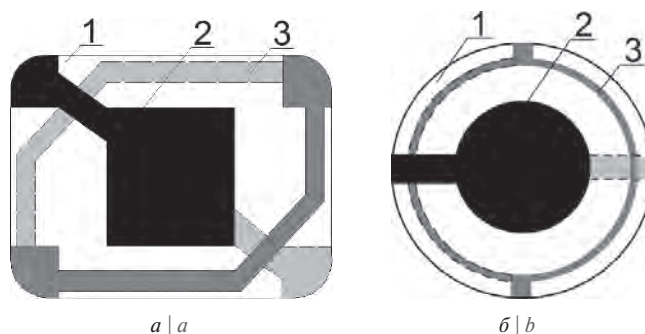


Рис. 2. Конструкция пьезоэлемента с напыленными нагревателями: № 1 — прямоугольный ПЭ 7×10 мм (а), № 2 — круглый ПЭ диаметром 10 мм (б); 1 — пластина ПЭ, 2 — электроды, 3 — нагреватели
Fig. 2. Designs of piezoelectric elements with film heaters: № 1 — rectangular PE 7×10 mm (a), № 2 — round PE with a diameter of 10 mm (b). 1 — PE plate, 2 — electrodes, 3 — heaters

$$[(\lambda_1 + \lambda_e m)dT/dx; (\lambda_3 + \lambda_e m)dT/dz], \quad (2)$$

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 теплоемкость кварца, ρ — плотность кварца, $2Q_{\text{из}}$ — потери на тепловое переизлучение между двумя сторонами поверхности пластины и внутренней поверхностью корпуса, $Q_{\text{ог}}$ — потери через тепловую проводимость остаточного газа в вакууме, Q_n — количество теплоты, выделяемой на нагревателе.

Тепловой поток, переизлучаемый между ПЭ и стенками корпуса КРТ, согласно [4, 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, выведенные на основании закона Стефана — Больцмана:

in IHR with distributed piezoelement heater in warm-up mode, optimizing IHR construction by calculations on three-dimensional thermal model. The calculations on the model will determine the warm-up power of PE film heater for minimal FST, which is necessary to achieve the minimal FST on the one hand, and the acceptable steepness of the control characteristic of the thermostat for low phase noise level and Allan variation, on the other.

The method of research in this paper is making a spatial thermal model for the design of PE with direct heating, as well as calculating the temperature field on this model by the finite element method in the time domain from the moment of switch-on to the steady state and the subsequent analysis of the calculation results.

There is a method of calculating the FST with the parameters determined by IHR design and thermal regulator controlling the

warm-up power described in [1] and made in accordance with [2].

In the model given in [1] on the basis of electrothermal analogy for simplification of calculations it is considered that PE temperature is identical in each its point, which does not correspond to real thermal processes. In this model, only the heat capacity of PE is taken into account. However, when PE is warmed, the rate of heat propagation from the heater by the PE volume is limited by the specific thermal conductivity of quartz, and the temperature in the volume of PE has a pronounced unevenness of temperature field, especially in warm-up mode and can have local peak values that can cause damage to the structural elements. It should be noted that quartz, being an anisotropic crystalline material, has different values of specific thermal conductivity in the directions of crystallographic axes, which should also be taken into account in the calculations.

Currently, the scientific literature does not sufficiently cover the issue of minimizing the FST in terms of the dynamics of the PE temperature field in the warm-up mode and determining the minimum possible FST in the calculation and design of OCXO with direct and combined heating, taking into account all influencing factors.

The geometric dimensions of PE of OCXO having different values of characteristics such as nominal frequency, long-term and short-term frequency instability, etc., differ significantly, therefore, due to the difference in heat capacity, it is necessary to talk about minimizing the heating time of PE for each type of OCXO. Let us consider the actual problem of minimizing the warm-up time on the example of precision OCXO with a typical frequency of 10 MHz. In practice, PE of two designs are most often used in precision OCXO with an output frequency of 10 MHz:



$$Q_{ic} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

$$\text{где } \varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4)$$

— приведенная степень черноты пьезоэлемента и стенок корпуса, C_0 — постоянная Стефана — Больцмана, T_1 и T_2 — температуры ПЭ и стенок корпуса соответственно. Излучением с торцевых сторон ПЭ ввиду его малой толщины можно пренебречь.

Еще одним фактором, влияющим на время готовности ТСКГ, является температурно-частотная зависимость кварцевого пьезоэлемента. 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 определенной точностью, поскольку скорость распространения тепловой энергии в ПЭ ограничена величиной удельной теплопроводности кварца. В общем виде температурно-частотную характеристику (ТЧХ) для ПЭ каждого среза удобно представлять в виде степенной функции [5, с. 60]

$$f(T) = a_0 + a_1(T_0 - T) + a_2(T_0 - T)^2 + a_3(T_0 - T)^3, \quad (5)$$

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 описывается выражением [5, с. 61]

$$f(T) = a_2(T_1 - T)^2, \quad (6)$$

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

Из (6) 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 ее минимально допустимое рабочее значение, до значения, отличающегося от температуры статирования (экстремума ТЧХ резонатора, приблизительно равного 75°C) менее чем на $4,65^\circ\text{C}$. На рис. 3 это значения параболы выше штриховой линии.

Для конструкции ПЭ №1, изображенной на рис. 2а, построим пространственную тепловую модель, учитывающую все описанные выше влияющие факторы.

Количество теплоты, выделяемое на нагревателях и управляемое идеальным безынерционным терморегулятором:

$$Q_n = P \cdot t, \quad (7)$$

где P — мощность разогрева, t — время разогрева.

Выражения (1) и (2) с учетом (3), (4), (6) и (7) являются математической пространственной моделью динамических тепловых процессов в ПЭ с учетом вышеперечисленных влияющих факторов. Решение системы дифференциальных уравнений (1–4, 6, 7) в частных производных с граничными условиями, определяемыми в пространстве элементами конкретной конструкции, позволяет рассчитать динамику тепловых процессов в ПЭ для каждой конструкции.

rectangular PE with lengths of 10 mm and a width of 7 mm (construction No. 1, shown in Fig. 2a) and round PE with a diameter of 10 mm (construction No. 2, shown in Fig. 2b). Both piezoelectric elements have a plane-convex profile with a radius of curvature of the sphere equal to 300 mm and excited on the 3rd mechanical harmonic. Both designs have geometrically closed double-sided film heaters and are mounted with 4 holders.

OCXO with PE of the presented designs provide equally high characteristics, but the value of the thermal capacity of piezoelectric elements of the construction No. 2 is slightly larger than that of the construction No. 1, and the power of the initial heating will also require a little more, so the PE of the construction No. 1 has been chosen for the study.

THREE-DIMENSIONAL THERMAL MATHEMATICAL IHR MODEL

For the design of PE No. 1 shown in Fig. 2a, we construct a spatial thermal model that allows us to calculate the dynamic temperature field. Direct temperature control of PE is carried out by maintaining the temperature

by means of a metal film heater sprayed on the surface of the PE plate through which an electric current flows. The film heater, due to the peculiarities of the excitation conditions of electromechanical oscillations, is made in the form of a thin strip located at the edge of the quartz plate at the maximum distance from the active zone of oscillations. PE by means of heat-insulating holders is attached inside the vacuum housing of the IHR.

The heating rate of a plate of quartz PE also depends on the heat losses through the holders of PE, on their places of attachment, on the thermal radiation from the surface of the plate and on the heat transfer through the thermal conductivity of the residual gas in the evacuated housing of the resonator; therefore, these factors should be taken into account in the model. Taking the plate thickness (y-axis) that is small in comparison with the length and width (x-, z-axis) to simplify the calculations and considering the temperature inhomogeneity in thickness insignificant, the heat distribution equation (differential heat transfer equation) at each point of the PE quartz plate is described by the following expression [3]:

$$\text{div}(q) - 2Q_{ic} - 2Q_{og} + Q_n = c \cdot \rho \cdot dT/dt, \quad (1)$$

where q is the heat flux density described by the vector:

$$[(\lambda_1 + \lambda_e m)dT/dx; (\lambda_3 + \lambda_e m)dT/dz], \quad (2)$$

where λ_1 and λ_3 are specific thermal conductivity of quartz along the axes x and z, λ_e is specific thermal conductivity of the electrode, m is the coefficient equal to 1 at points of the surface where the electrode or current collector is and equal to 0 where the surface of the quartz plate is free, and T is the temperature calculated in the point — specific heat of quartz, ρ is the density of quartz, $2Q_{ic}$ is losses on the thermal re-emission between the two sides of the plate surface and the inner surface of the housing, Q_{og} is losses through the thermal conductivity of the residual gas in the vacuum, Q_n is the amount of heat generated in the heater.

The heat flux re-radiated between PE and the walls of the IHR case according to [4, p. 179] is determined by the expression for radiant heat transfer between bodies with parallel gray flat surfaces 1 and 2 of the radiation area S_1 and S_2 with a degree of blackness ε_1 and ε_2 and

Исходные данные, использующиеся при построении модели, приведены в табл. 1. Эти данные определены физическими свойствами материалов и геометрией конструкции ПЭ.

В [8] приведены результаты расчета зоны активных колебаний С-моды плосковыпуклого (радиус сферы 300 мкм) ПЭ конструкции №1 на основе модели собственных колебаний сдвига по толщине в кварцевом пьезоэлементе, в графическом виде они представлены на рис. 4. ПЭ ТД-среза имеет размеры $7 \times 10 \times 0,05$ мм, возбуждается на 3-й межахармонике, частота 10 МГц.

Рис. 4 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. Расположение электродов резонатора практически совпадает с этой областью, и расчет ВУЧ КГ при включении сводится к определению момента, когда отклонение интегральной температуры в активной зоне ПЭ, то есть на электродах, от температуры статирования не будет превышать величину $4,65^\circ\text{C}$ (см. рис. 3). 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

$$T_{\text{ин}}(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{1}{S} \iint_D T(x, z) dx dz, \quad (8)$$

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

Расчеты на численно-аналитической модели позволяют определить оптимальную мощность разогрева, необходимую для достижения интегральной температуры области электродов с точностью $4,65^\circ\text{C}$ от установившегося значения, соответствующей отклонению по частоте от установившегося значения на величину $1 \cdot 10^{-7}$. Увеличение мощности разогрева, выделяемой напыленными нагревателями, уменьшает время разогрева ПЭ, но существует предел увеличения мощности, когда удельная теплопроводность кварца ограничивает распространение тепла в объеме ПЭ и не позволяет существенно уменьшить время достижения установившегося значения интегральной температуры на электродах. Расчеты показали, что для конструкции №1 увеличение мощности разогрева свыше 1,5–2 Вт практически не приводит к уменьшению времени разогрева (рис. 5), равного примерно 5,6 с, однако вызывает трудности для управления мощностью подогрева в установившемся режиме. Значение 1,5 Вт принято за оптимальное и использовано для дальнейших расчетов.

ПЭ конструкции №1 крепится к корпусу резонатора, имеющего температуру окружающей среды, при помощи четырех держателей, расположенных по углам.

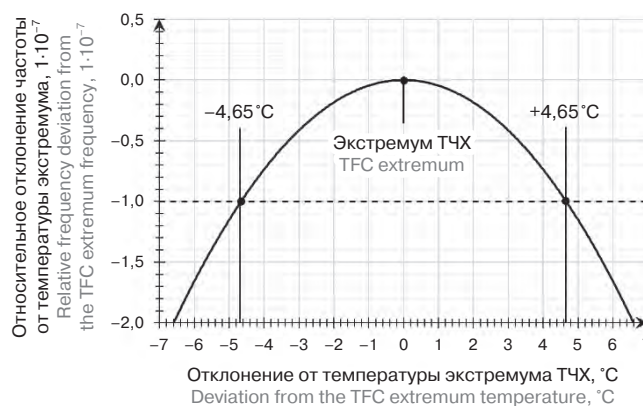


Рис. 3. Относительное отклонение частоты резонатора ТД-среза при отклонении температуры от температуры экстремума ТЧХ
Fig. 3. Relative frequency deviation of the SC-cut off resonator at temperature deviation from the temperature of the TFC extremum

Расчет динамики тепловых процессов этой конструкции при мощности разогрева 1,5 Вт показывает, что на протяжении режима разогрева от любой рабочей температуры окружающей среды значения температуры в любой точке ПЭ в любой момент времени не превышают 80°C , то есть не приближаются к значениям, опасным для элементов конструкции.

На рис. 6 показано распределение температуры в ПЭ конструкции №1 через 5,6 с после включения при температуре окружающей среды -60°C и температуре статирования 75°C в момент

Таблица 1. Исходные расчетные данные для ПЭ трех конструкций
Table 1. The input data estimated for three designs of PE

Параметр Parameter	Значение Value
Удельная теплоемкость кварца, Дж/(кг·К)* Specific heat of quartz, J/(kg·K)*	836
Удельная теплопроводность кварца перпендикулярно оптической оси при 0°C , Вт/(м·К)* Specific thermal conductivity of quartz on perpendicular to the optical axis direction at 0°C , W/(m·K)*	7,21
Удельная теплопроводность кварца параллельно оптической оси при 0°C , Вт/(м·К)* Specific thermal conductivity of quartz on parallel to the optical axis at 0°C , W/(m·K)*	13,6
Удельная теплопроводность серебра при 300 К, Вт/(м·К)** Specific heat conductivity of silver at 300 K, W/(m·K)**	429
Удельная теплопроводность золота при 300 К, Вт/(м·К)** Specific heat conductivity of gold at 300 K, W/(m·K)**	317
Удельная теплопроводность нихрома при 293°C , Вт/(м·К)** Specific heat conductivity of nichrome at 293°C , W/(m·K)**	12,6
Удельная теплопроводность никеля при 300 К, Вт/(м·К)** Specific heat conductivity of nickel at 300 K, W/(m·K)**	91,0
Удельная теплоемкость никеля при 250 К (400 К), Дж/(кг·К)* Specific heat of nickel at 250 K (400 K), J/(kg·K)*	416 (482)
Давление остаточного газа в вакууме, мм рт. ст. Pressure of residual gas in vacuum, mm Hg	0,00001
Толщина электрода, мкм Electrode thickness, μm	0,4
Толщина нагревателя, мкм Thickness of the film heater, μm	0,15

* Данные приведены из [5]. ** Данные приведены из [7].
* Data are from [5]. ** Data are given from [7].

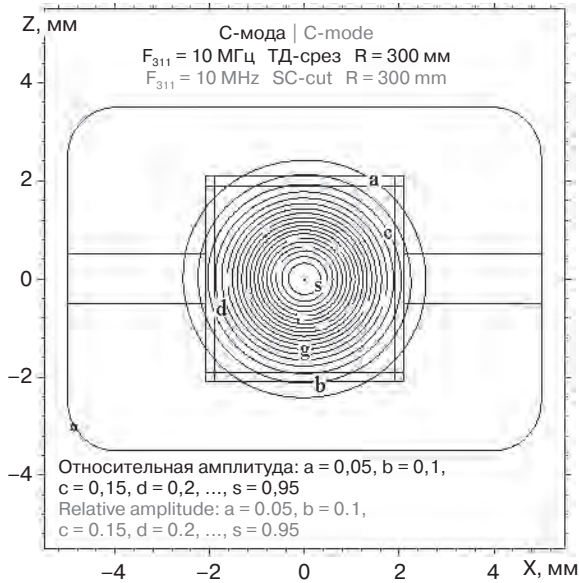


Рис. 4. Зона активных колебаний С-моды плосковыпуклого ПЭ ТД-срезу размерами $7 \times 10 \times 0,54$ мм, 3-я мехгармоника, радиус сферы 300 мм, частота 10 МГц

Fig. 4. The C-mode active oscillation zone of SC-cut off a plane-convex PE with size $7 \times 10 \times 0,54$ mm, 3rd mechanical harmonic, the radius of the sphere 300 mm, frequency 10 MHz

времени, когда отклонение интегральной температуры электродов от установившегося значения становится меньше $4,65^\circ\text{C}$.

Данная конструкция согласно расчетным 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

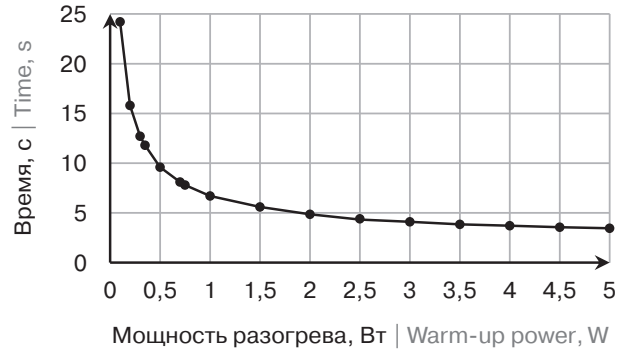


Рис. 5. График зависимости времени достижения установившегося значения интегральной температуры на электродах с точностью $4,65^\circ\text{C}$ от мощности разогрева ПЭ

Fig. 5. Graph of dependence of the time to achieve the steady state value of the integral temperature at the electrodes with a precision of 4.65°C on warm-up power of PE

охлаждение ПЭ в местах их крепления. На рис. 7 изображено трехмерное распределение температуры в области электродов: оси x и z в метрах, а вертикальная ось — температура в градусах Цельсия.

На рис. 8а показан график изменения температуры в центре ПЭ (точка 1), в месте крепления термодатчика (точка 2), температуры в области электродов и интегральной температуры в области электродов T_{int} в режиме разогрева, а на рис. 9б 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 $4,65^\circ\text{C}$ начиная с 5,6 с.

Изменение частоты термочувствительной В-моды, использованной для измерения интегральной температуры на электродах

temperature T_1 and T_2 , respectively, derived on the basis of the Stefan – Boltzmann law:

$$Q_{ic} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot S_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

$$\text{где } \varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4)$$

where ε_n is reduced degree of blackness of the piezoelectric element and the walls of the body, C_0 is Stefan – Boltzmann constant, T_1 and T_2 are the temperature of PE and the walls of the body, respectively. Radiation from the end faces of PE due to its small thickness can be neglected.

Another factor affecting the readiness time of OCXO is the temperature-frequency dependence of the quartz piezoelectric element. As mentioned above, when the OCXO turns on, it takes time to warm up the PE core to the stat temperature necessary to ensure the nominal value of the OCXO output frequency with a certain accuracy, since the rate of thermal energy propagation in PE is limited by the specific thermal conductivity of quartz.

In general, the temperature-frequency characteristic (TFC) for PE of each slice is conveniently represented as a power function [5, p. 60]:

$$f(T) = a_0 + a_1(T_0 - T) + a_2(T_0 - T)^2 + a_3(T_0 - T)^3, \quad (5)$$

where coefficients a_1 , a_2 , a_3 are frequency derivatives with respect to the temperature of the corresponding orders, T_0 is an arbitrarily selected temperature value.

The TFC for SC-cut resonators having a shape close to the quadratic parabola near the temperature of the extremum is described quite accurately by the expression [5, p. 61]:

$$f(T) = a_2(T_1 - T)^2, \quad (6)$$

where T_1 is the temperature of the TFC extremum of PE, $a_2 = -4.6 \cdot 10^{-9}$ for SC-cut according to the measurements presented in [6].

It follows from (6) that in order for the frequency of OCXO to be established

with an accuracy better than $1 \cdot 10^{-7}$ when it is switched on, the integral temperature in the active zone of oscillations of the PE according to the superposition principle must increase from the ambient temperature, including its minimum permissible operating value, to a value different from the static temperature (TFC extremum of PE, approximately equal to 75°C) by less than 4.65°C . See the values of the parabola above the dashed line on Fig. 3.

For the design of PE No.1 shown in Fig. 2a, we construct a spatial thermal model that takes into account all the factors described above.

The amount of heat generated by the heaters and controlled by the ideal non-inertial thermostat is derived by:

$$Q_n = P \cdot t, \quad (7)$$

where P is the warm-up power, t is the warm-up time.

Expressions (1) and (2), subject to (3), (4), (6) and (7), are mathematical spatial model

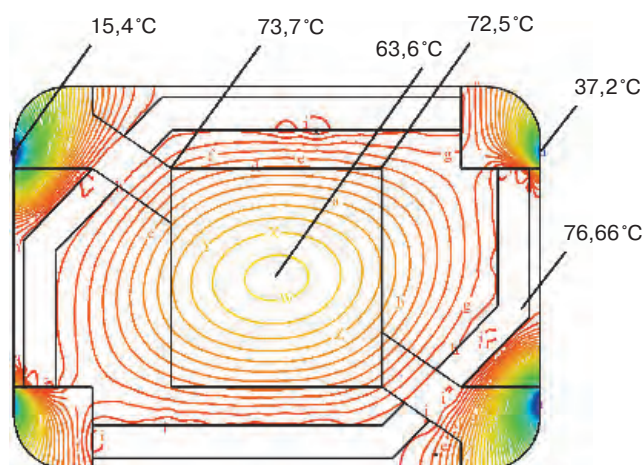


Рис. 6. Распределение температуры в ПЭ конструкции №1 через 5,6 с после включения подогрева

Fig. 6. Temperature distribution in PE design No. 1 at 5.6 sec after warm-up is on

при включении ТСКГ с ПЭ конструкции №2, разогреваемого мощностью 1,5 Вт, при температуре окружающей среды 25°C показало, что температура статирования достигается примерно через 3,5 с (см. рис. 9). Расчетное время разогрева области электродов ПЭ такой конструкции в подобных условиях составило 3,4 с, что говорит о хорошем совпадении эксперимента с расчетными данными.

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты.

1. Представлена пространственная тепловая модель, позволяющая получить пространственное распределение динамического температурного поля для любой конструкции

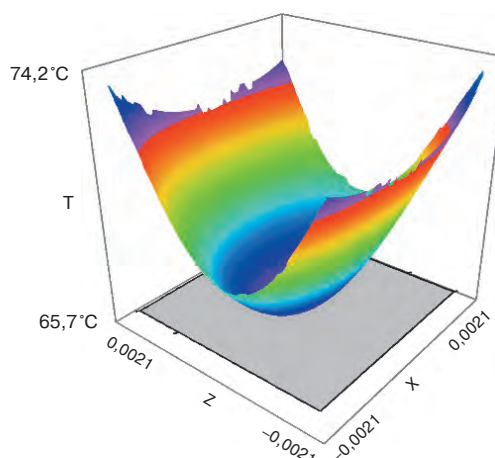


Рис. 7. Распределение температур на квадратном электроде ПЭ конструкции №1 через 5,6 с после включения

Fig. 7. Temperature distribution on the square electrode of PE design No. 1 at 5.6 s after power is on

пьезоэлемента с прямым подогревом и определить расчетным путем время установления частоты генератора с заданной точностью с момента включения.

2. Расчеты на представленной пространственной тепловой модели позволяют определить оптимальную мощность начального разогрева для ПЭ с прямым подогревом любой конструкции для уменьшения времени установления частоты.

Актуальность темы исследования, как было показано выше, заключается в том, что его результаты позволят уменьшить время установления частоты опорных прецизионных генераторов, которое позволит в ряде случаев снизить время готовности радиотехнических и электронных систем с момента включения.

of dynamic thermal processes in PE taking into account the above-mentioned influencing factors. The solution of a system of partial differential equations (1–4, 6, 7) with boundary conditions determined in space by elements of a particular design allows us to calculate the dynamics of thermal processes in PE for each design.

The input data used in the construction of the model are given in Table 1. These data are determined by the physical properties of the materials and the geometry of the PE design.

See [8] for the results of calculation of the zone of active oscillations of the C-mode of a plane-convex (sphere radius 300 mm) PE of the structure No. 1 on the model of natural vibrations of shear thickness in a quartz PE, and in graphical form they are presented in Fig. 4. The SC-cut PE has dimensions 7×10×0.05 mm, excited for the 3rd mechanical harmonic, the frequency of 10 MHz.

Figure 4 illustrates that the zone of active oscillations of the C-mode is concentrated in the center of the PE inside an ellipse close to a circle with a diameter of 4.4 mm

dimensions in this zone, limited by the line “a”, where vibrations with an amplitude of at least 5% of the maximum located in the geometric center of the PE are concentrated. The location of the resonator electrodes practically coincides with this area, and the calculation of the FST of the OCXO when switched on is reduced to the determination of the moment when the deviation of the integral temperature in the active zone of PE, that is, on the electrodes, from the stat temperature will not exceed the value of 4.65°C (Fig. 3). To do this, it is necessary to calculate the temperature field in PE from the moment when the OCXO is switched on until the steady state. The integral (average) value of the temperature on the electrodes is calculated by the formula

$$T_{int}(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{1}{S} \iint_D T(x, z) dx dz, \quad (8)$$

where D is the region of electrodes, T_{int} is the average temperature in the region D , S is the area of electrodes, x , z are the coordinates of the points in the region D .

RESEARCH RESULTS OF THE TEMPERATURE FIELD DYNAMICS USING PE MODEL

Calculations on the numerical-analytical model allow us to determine the optimal heating power required to achieve the integral temperature of the electrode region with an accuracy of 4.65°C from the steady state value corresponding to the frequency deviation from the steady state value by $1 \cdot 10^{-7}$. The increase in the heating power generated by the film heaters reduces the warm-up time of PE, but there is a limit to an increase in power when the specific thermal conductivity of quartz limits the distribution of heat in the volume of PE and does not significantly reduce the time to reach the steady state integral temperature on the electrodes. Calculations have shown that for the construction No. 1 an increase in heating power over 1.5–2 W practically does not lead to a decrease in heating time (Fig. 5), equal to approximately 5.6 s, but causes difficulties in controlling the heating power in steady state. The value of 1.5 W is taken as optimal and used for further calculations.

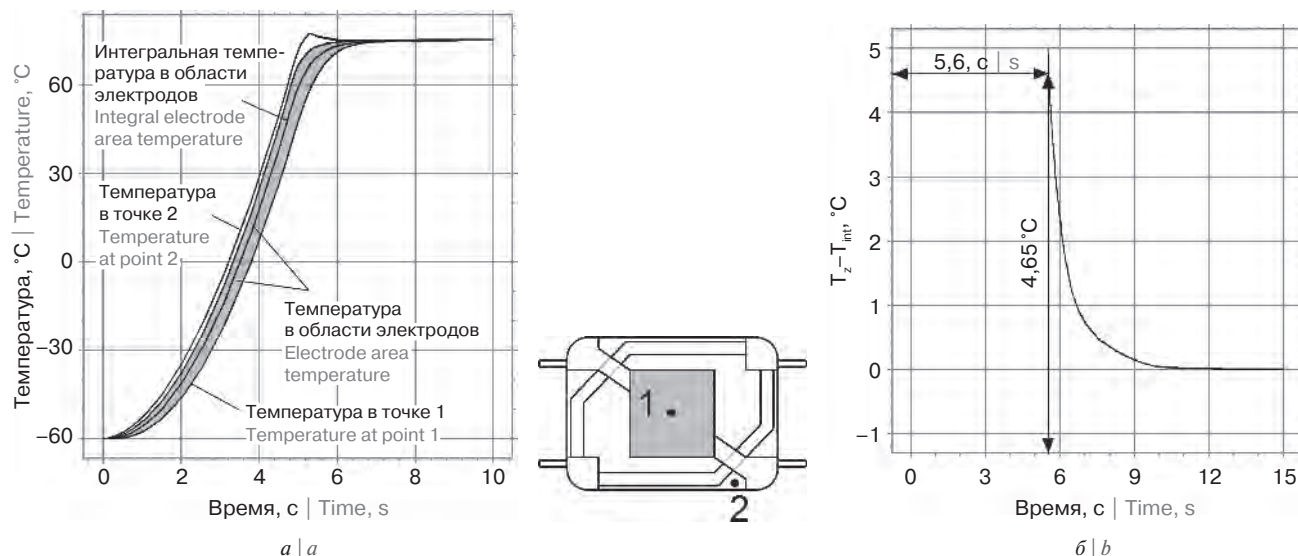


Рис. 8. Изменение температуры в области электродов (выделена темным), в центре электрода (точка 1), в месте крепления термодатчика (точка 2) и интегральной температуры на электродах конструкции № 1 с момента включения нагревателей мощностью 1,5 Вт до наступления установившегося режима при температуре окружающей среды -60°C (а) и отклонение интегральной температуры электродов T_{int} от установившегося значения T_z в режиме разогрева (б)

Fig. 8. Temperature changing in the electrodes area (highlighted dark), in the center of the electrode (point 1), in the temperature sensor place (point 2) and integral electrodes temperature T_{int} of design No. 1 PE from the moment of switching warm-up power of 1.5 W to the steady state at ambient temperature -60°C (a), and the deviation of the integral temperature of electrodes T_{int} from the steady state T_z in the warm-up mode (b)

Исследование результатов расчетов 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 ПЭ типовой

конструкции № 1 (прямоугольная кварцевая пластина размерами $7 \times 10 \times 0,54$ мм с геометрически замкнутым нагревателем), равна 1,5–2 Вт.

- Тепловая пространственная модель, представленная в данной работе, позволяет рассчитать с заданной точностью для каждой конструкции КРТ с прямым подогревом ПЭ минимально

PE design No. 1 is attached to the case of the resonator having an ambient temperature, using four holders located at the corners. The calculation of the dynamics of thermal processes of this design with a heating power of 1.5 W shows that during the heating mode from any operating ambient temperature, the temperature values at any point of the PE at any time do not exceed 80°C , that is do not approach the values dangerous to the structural elements.

Figure 6 shows the temperature distribution in the PE of design No. 1 at 5.6 seconds after power is on at ambient temperature -60°C and stat temperature of 75°C at a time when the deviation of the integral temperature of the electrodes from the steady state value becomes less than 4.65°C .

This design according to the calculated data provides uniform heating of PE with temperature unevenness in the electrode zone no more than 0.13°C in steady state. Low thermal conductivity of the holders provides a slight cooling of the PE in the places of their attachment. Figure 7 shows the three-dimensional temperature distribution in the electrode region: the x

and z axes in meters, and the vertical axis—the temperature in degrees Celsius.

Figure 8 shows a graph of temperature changing in the center of the PE (point 1), in place of mounting the temperature sensor (point 2), the temperature in the region of the electrodes and integral temperature of the electrodes region T_{int} in the warm-up mode. Figure 9 shows the dynamic temperature deviation of the electrodes T_{int} from the steady state values of T_z in the warm-up mode. The graph shows that the value of $T_z - T_{int}$ does not exceed 4.65°C , starting from 5.6 seconds.

THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCHES

The changing in the frequency of the thermosensitive B-mode used to measure the integral temperature on the electrodes when the OCXO with PE of the design No. 2 is heated with a power of 1.5 W at an ambient temperature of 25°C , showed that the temperature of the stat is reached after about 3.5 s (see Fig. 10). The estimated heating time of the region of PE electrodes of such a design in such conditions

was 3.4 s, which indicates a good agreement of the experiment with the calculated data.

CONCLUSIONS

The author considers the following provisions and results in this work as novel:

1. The paper presents a spatial thermal model that allows obtaining the spatial distribution of the dynamic temperature field for any design of the piezoelectric element with direct heating and determining by calculation the OCXO frequency setting time from the moment the power is on with a given accuracy;
2. Calculations on three-dimensional thermal model allows determining the optimal initial warm-up power for PE with the direct heating of any design to reduce the frequency setting time.

The relevance of the research theme, as shown above, is that its results will reduce the frequency setting time of reference precision generators (OCXO), which will in some cases reduce the readiness time of radio and electronic systems from the moment of switching on.

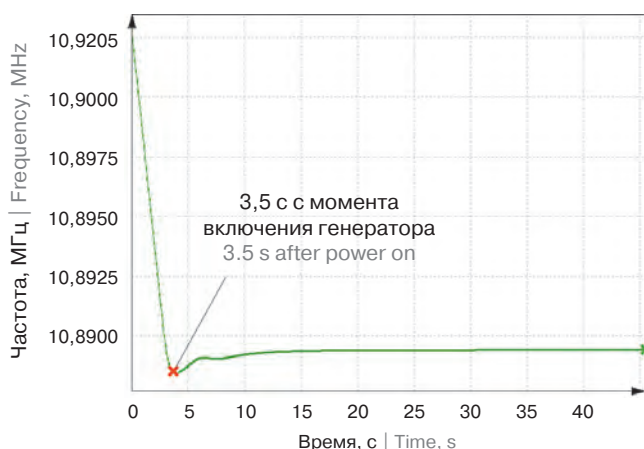


Рис. 9. Изменение частоты В-моды при включении ТСКГ с ПЭ конструкции № 1, разогреваемого мощностью 1,5 Вт при температуре окружающей среды 25 °С

Fig. 9. Changing the frequency of the B-mode when OXCO with PE design No. 1 is switched on. PE is heated with a power of 1.5 W at an ambient temperature of 25 °C

возможное время разогрева зоны активных колебания без учета инерционности системы терморегулирования и ее управляющей характеристики, то есть для ТСКГ с идеальным терморегулятором.

- Прямой подогрев теоретически без учета инерционности системы терморегулирования и влияния температурно-механических напряжений 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°C до 75°C).

The study of the results of calculations of the dynamic temperature field of PE design with direct heating, most often used in precision OXCO, allows us to draw the following conclusions:

- Optimum power required for fast warm-up of PE electrodes region of the standard design No. 1 (rectangular quartz plate with dimensions $7 \times 10 \times 0.54$ mm with geometrically closed heater) is equal to 1.5–2 watts;
- Thermal spatial model presented in this paper allows us to calculate for each design of IHR with the direct heated PE the minimum possible warm-up time of the active oscillation zone with a given accuracy without taking into account the inertia of the thermal control system and its control characteristics, that is, for OXCO with an ideal thermostat;
- Theoretically heating, without taking into account the inertia of the thermal control system and the influence of thermal-mechanical stresses can reduce the readiness time of precision OXCO with an output frequency of 10 MHz with an accuracy

of $1 \cdot 10^{-7}$ to 6s in a wide range of operating temperatures (from -60°C to 75°C);

- Calculated values to reduce the warm-up time of the active oscillations zone of piezoelectric element to the precision OXCO with output frequency of 10 MHz to 3.5 s at an ambient temperature of 20°C and the adequacy of the model have been confirmed by experimental results.

REFERENCES

- Kutalev A. I. *Kvartsevyi rezonator-termostat s raspredelennym nagrevatelem* // Tekhnika radiosvyazi, 2007, vyp. 12. — P. 78–87. (In Russian).
- Kvartsevyi rezonator-termostat: patent 2236746, Rossiiskaya Federatsiya, MPK H03H9/08 / A. I. Kutalev; zayavitel' i patentoobladatel' FGUP ONIIP — № 2003100159, zayavl. 04.01.2003, opubl. 20.09.2004, byul. № 26. (In Russian).
- Shi D. *Chislennye metody v zadachakh teploobmena*. M.: Mir, 1988. 544 p. (In Russian).
- Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* / Izd. 2-e, stereotip. M., «Energiya». 1977. 344 p. (In Russian).
- P'ezoelektricheskie rezonatory: Spravochnik* / pod red. P. E. Kandyby i P. G. Pozdnyakova. M.: Radio i svyaz', 1992. 392 p. (In Russian).
- Lozhnikov A. O., Ermolenko S. V. *Issledovanie spektra kolebaniy kvartsevykh rezonatorov dvukhpovorotnykh srezov s uluchshennoy monochastotnost'yu* // Tekhnika radiosvyazi, nauch.-tekh. sb., vyp. 2 (29), 2016. P. 101–108. (In Russian).
- Fizicheskie velichiny: Spravochnik* / pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Meilikhova. — M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (In Russian).
- Khomenko I. V. *Rezultaty issledovaniya termostatirovannogo kvartsevogo generatora s dyukhmodovym vozbuzhdeniem rezonatora TD-sreza na chislenno-analiticheskoi modeli* // Omskii nauchnyi vestnik. Ser. «Pribory, mashiny i tekhnologii», 2008. № 3 (70). P. 115–121. (In Russian).

- Расчетные значения по снижению времени разогрева зоны активных колебаний пьезоэлемента прецизионного ТСКГ 10 МГц до 3,5 с при температуре окружающей среды 20°C и адекватность модели подтверждены экспериментальными результатами.

ЛИТЕРАТУРА

- Куталёв А. И. Кварцевый резонатор-термостат с распределенным нагревателем // Техника радиосвязи, 2007, вып. 12. — С. 78–87.
- Кварцевый резонатор-термостат: патент 2236746, Российская Федерация, МПК H03H9/08 / А. И. Куталёв; заявитель и патентообладатель ФГУП ОНИИП — № 2003100159, заявл. 04.01.2003, опубл. 20.09.2004, бюл. № 26.
- Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. — М.: Мир, 1988. — 544 с.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи / Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия». 1977. — 344 с.
- Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / под ред. П. Е. Кандыбы и П. Г. Позднякова. М.: Радио и связь, 1992. — 392 с.
- Ложников А. О., Ермоленко С. В. Исследование спектра колебаний кварцевых резонаторов двухповоротных срезов с улучшенной моночастотностью // Техника радиосвязи, науч.-тех. сб., вып. 2 (29), 2016. — С. 101–108.
- Физические величины: Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
- Хоменко И. В. Результаты исследования термостатированного кварцевого генератора с двухмодовым возбуждением резонатора ТД-среза на численно-аналитической модели // Омский научный вестник. Сер. «Приборы, машины и технологии», 2008. — № 3 (70). — С. 115–121.