

Управление качеством продукции. Стандартизация  
Product quality management. Standardization

УДК 621.374  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Исследование надежности характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах

М.И. Бойчук<sup>1, 2, @</sup>,  
В.Е. Кривоногов<sup>2</sup>,  
С.А. Микаева<sup>1</sup>,  
Л.А. Васильева<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «ЛИТ-ФОНОН», Москва, 107076 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: [bojchuk@mirea.ru](mailto:bojchuk@mirea.ru)

## Резюме

**Цели.** При разработке современных приборов радиоэлектроники и связи большое значение имеет выполнение требований, предъявляемых к ее надежности, стабильности генерируемых частот, избирательности приемной аппаратуры. Применение кварцевых резонаторов, широко используемых в радиосхемах сегодня, частично позволило повысить надежность средств связи и гарантировало высокую стабильность частоты без усложнения схемы. Современные мировые тренды разработки электротехнической аппаратуры связаны с ее миниатюризацией. Габариты кварцевых резонаторов с каждым годом уменьшаются, при этом требования к надежности характеристик остаются высокими. Цель работы – оценка возможности применения кварцевых резонаторов, представленных в миниатюрном керамическом корпусе размером  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  мм, в условиях повышенной температуры окружающей среды, а также выработка оптимальных требований к режиму термотренировки, который является базовой технологической операцией для стабилизации частоты колебаний.

**Методы.** Испытание кварцевых резонаторов на безотказность и методы статистического моделирования в радиотехнике.

**Результаты.** Установлены требования к надежности характеристик кварцевых резонаторов РК588 в миниатюрных керамических корпусах размером  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  мм при воздействии повышенной температуры окружающей среды  $+85^\circ\text{C}$  и  $+125^\circ\text{C}$ . Установлены требования по уходу частоты при воздействии повышенной температуры окружающей среды на тип кристаллической пластины, созданной на основе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Оптимизирован способ термотренировки и установлены коэффициенты старения.

**Выводы.** Расчетный коэффициент старения резонаторов в процессе испытаний на безотказность для партии № 1 при температуре  $+85^\circ\text{C}$  составил 0.75, а для партии № 2 при температуре  $+125^\circ\text{C}$  составил 0.18. Для данного типа пьезоэлемента размером  $1.5 \times 1.0$  мм при рабочей температуре  $+125^\circ\text{C}$  коэффициент старения ниже в 4 раза, чем при температуре  $+85^\circ\text{C}$ , что говорит о возможности применения резонатора РК588 в условиях повышенной температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** кварцевый резонатор, надежность, керамический корпус, частота колебаний, температура

• Поступила: 21.12.2021 • Доработана: 27.12.2021 • Принята к опубликованию: 24.02.2022

**Для цитирования:** Бойчук М.И., Кривоногов В.Е., Микаева С.А., Васильева Л.А. Исследование надежностных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):43–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages

Maksim I. Boychuk<sup>1, 2, @</sup>,  
Vladislav E. Krivonogov<sup>2</sup>,  
Svetlana A. Mikaeva<sup>1</sup>,  
Lyubov A. Vasilieva<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>2</sup> LIT-FONON, Moscow, 107076 Russia

@ Corresponding author, e-mail: boychuk@mirea.ru

### Abstract

**Objectives.** In the development of radio electronics and communications, it is important that the requirements for the reliability, stability of the generated frequencies, and selectivity of the receiving equipment are fulfilled. The use of quartz resonators, widely used in radio circuits today, has partially allowed for the reliability of communication devices and guaranteed high frequency stability to be enhanced without complicating the circuit. Modern global trends in the development of electrical equipment are associated with miniaturization. The dimensions of quartz resonators are decreasing every year, while the requirements for reliability remain high. The study aimed to evaluate the possibility of using quartz resonators packaged in a miniature ceramic case  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  mm, under conditions of elevated ambient temperature. It has also allowed for the development of optimal requirements for the thermal training regime as the basic technological operation for stabilizing the oscillation frequency.

**Methods.** Reliability testing of quartz resonators and methods of statistical modeling in radio engineering.

**Results.** The results established the requirements for the reliability of *RK588* quartz resonators in miniature ceramic cases  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  mm in size under the influence of elevated ambient temperatures of  $+85$  °C and  $+125$  °C. The requirements for frequency drift when exposed to elevated ambient temperature on the crystalline plate type based on RF patent No. 27122426 “Method of manufacturing thin crystalline plates and thin crystalline elements” were also specified. The method of thermal training was optimized and the ageing coefficients were established.

**Conclusions.** The coefficients of ageing calculated for the resonators during the reliability tests was as follows: Batch No. 1 at a temperature of  $+85$  °C was 0.75; and for Batch No. 2 at a temperature of  $+125$  °C was 0.18. For this type of piezoelectric element with a size of  $1.5 \times 1.0$  mm at an operating temperature of  $+125$  °C the ageing coefficient is 4 times lower than at a temperature of  $+85$  °C. This indicates the possibility of using the *RK588* resonator at elevated ambient temperatures.

**Keywords:** quartz resonator, reliability, ceramic case, oscillation frequency, temperature

• Submitted: 21.12.2021 • Revised: 27.12.2021 • Accepted: 24.02.2022

**For citation:** Boychuk M.I., Krivonogov V.E., Mikaeva S.A., Vasilieva L.A. Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):43–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке современных приборов радиоэлектроники и связи большое значение имеет выполнение высоких требований, предъявляемых к ее надежности, стабильности генерируемых частот, избирательности приемной аппаратуры. Проблема повышения надежности средств связи частично была решена за счет применения кварцевых резонаторов, которые широко используются в радиосхемах сегодня. Использование кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать высокую стабильность частоты без усложнения схемы. Электрофильтры с кварцевыми резонаторами обладают более высокими параметрами, чем аналогичные фильтры с катушками индуктивности и конденсаторами<sup>1</sup>.

В настоящее время производство кварцевых резонаторов считается экономически прибыльным, несмотря на то что появились материалы, стабильность отдельных параметров которых выше, чем у кварца.

Один из способов повышения конкурентоспособности производства – снижение цены изделий, которое можно реализовать, изменив технологию их изготовления. Например, за счет изменения режима термотренировки возможно сократить время производства без снижения качества изделия. Однако не все технологические процессы можно изменить.

Термообработка – выдержка при высокой температуре на протяжении определенного времени – один из важных моментов при изготовлении кварцевого резонатора. Этот процесс идет на финальном этапе производства изделия [1]. Данная технологическая операция предназначена для создания искусственных условий старения кварцевого резонатора.

Процесс старения кварцевого резонатора – это комплекс разных физических процессов, которые с течением времени приводят к изменению резонансной частоты изделия. Поскольку большинство таких процессов стремится вернуться в состояние

термодинамического равновесия, то после их завершения резонатор переходит в стабильное состояние, а уходы частоты становятся незначительными, допустимыми для большинства приборов [2].

Процесс старения считается сложным и многоэтапным, поэтому режим термотренировки подбирается экспериментально, исходя из условий эксплуатации определенного типа кварцевого резонатора.

Чаще всего термотренировка занимает больше времени, чем само изготовление резонатора. Сложность и многообразие самих процессов старения кварцевого резонатора не позволяют оценить поведение каждого конкретного изделия и выполнить для него расчет наиболее подходящих режимов [3].

Цель работы заключается в оценке возможности применения кварцевых резонаторов, представленных в миниатюрном керамическом корпусе размером  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  мм, в условиях повышенной температуры окружающей среды, а также выработка оптимальных требований к режиму термотренировки, который является базовой технологической операцией для стабилизации частоты колебаний.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РК588

Изменение частоты кварцевого резонатора во времени происходит при стабильных условиях работы вследствие необратимых изменений свойств кристаллов, крепежных элементов и связанных с ними устройств. При этом наблюдается несколько характерных особенностей:

- в большинстве случаев процесс старения описывается экспоненциальным законом уходов частоты резонаторов во времени. Плавный ход кривой старения нарушается, ее величина и характер зависят от типа резонатора;
- скорость старения увеличивается с повышением температуры;
- относительный уход частоты при старении и его характер зависят от свойств инертного газа в корпусе, где находится кварцевый резонатор [4].

В научно-производственном комплексе «Кварцевые генераторы и резонаторы» акционерного общества «ЛИТ-ФОНОН» есть оборудование, которое позволяет провести эксперимент при температурах  $+85$  °C и  $+125$  °C. Для эксперимента

<sup>1</sup> Бойчук М.И. *Цифровой термокомпенсированный кварцевый генератор в керамическом корпусе для поверхностного монтажа*: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИРЭА; 2019. 163 с. [Boychuk M.I. *Digital temperature-compensated crystal oscillator in a ceramic case for surface mounting*. Cand. Sci. Thesis. Moscow: MIREA; 2019. 163 p. (in Russ.).]

случайной выборкой были взяты 42 резонатора типа РК588 в керамическом корпусе с габаритными размерами  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  мм и номинальной частотой 40 МГц (рис. 1), которые создавались на базе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Размер кварцевого пьезоэлемента с напыленным серебросодержащим электродом составил  $1.5 \times 1.0$  мм.

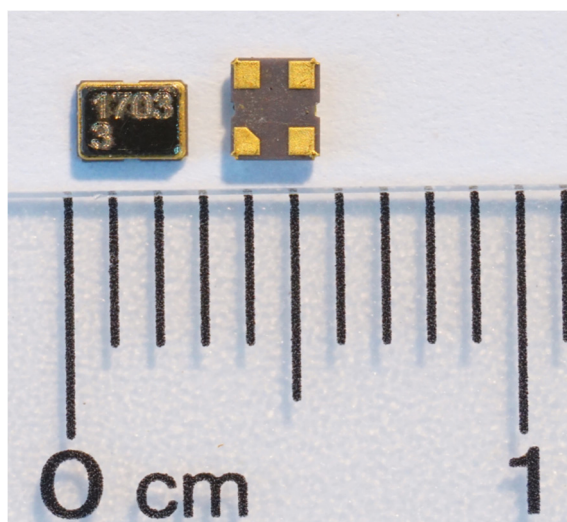


Рис. 1. Внешний вид кварцевого резонатора РК588

Из 42 резонаторов были сформированы 3 партии по 14 в каждой (далее – партия № 1, партия № 2, партия № 3). Партия № 1 состояла из резонаторов, которые подверглись термотренировке при температуре  $+85^\circ\text{C}$  в течение 1000 ч. Партия № 2 состояла из резонаторов, исследование которых велось при температуре  $+125^\circ\text{C}$  в течение 1000 ч. Партия № 3 тоже исследовалась при температуре  $+125^\circ\text{C}$ , но на протяжении 100 ч. Замер частоты резонаторов партий № 1 и № 2 проводился в таком порядке: 125, 250, 500 и 1000 ч; замер партии № 3 проводился ежедневно через каждые 24 ч. Перед началом эксперимента частоты всех резонаторов были замерены при помощи технологического оборудования «Динар» (рис. 2). После замера партии № 1 резонаторы были установлены в термокамеру при температуре  $+85^\circ\text{C}$ , для партий № 2 и № 3 был установлен температурный режим  $+125^\circ\text{C}$ . Через каждый установленный промежуток времени термокамера входила в режим медленного остывания. Это позволило избежать большого значения температуры в кристаллическом пьезоэлементе кварцевого резонатора, которое могло бы привести к высокой нагрузке кристалла, электрода и повлиять на его частоту [5].

Через 12 ч после того, как термокамера заканчивала процесс медленного остывания, резонаторы из активного режима достигали термодинамического

равновесия с окружающей средой при комнатной температуре. В таких условиях были проведены измерения частоты, описываемые ниже.

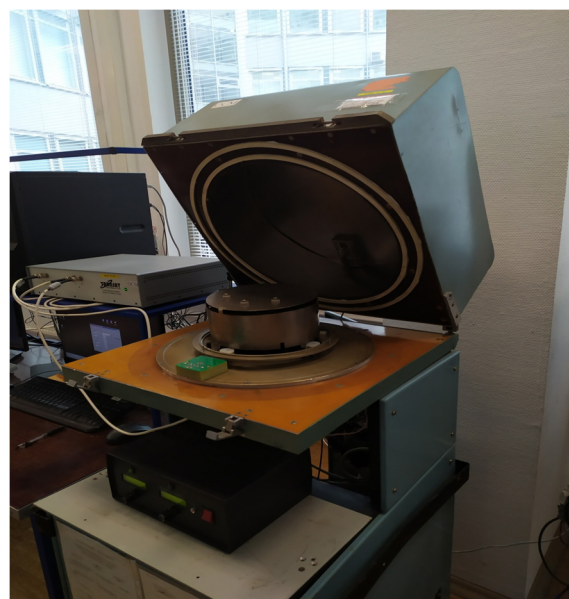


Рис. 2. Термостатирующая частотоизмеряющая установка «Динар»

Все испытания и замеры частот этого эксперимента производились на технологическом оборудовании – частотоизмеряющей установке «Динар». Установка позволяет провести замеры частот резонатора в интервале от 1 Гц до 100 МГц. Точность замера уменьшается с увеличением частоты резонатора. Для того чтобы избежать ошибки в расчетах отклонения частоты от нормы, необходимо определить погрешность замеров для каждого типа резонаторов.

Чаще всего замеры частоты проводятся в относительных единицах [6]:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{DAC}}} = \frac{f - f_{\text{DAC}}}{f_{\text{DAC}}}, \quad (1)$$

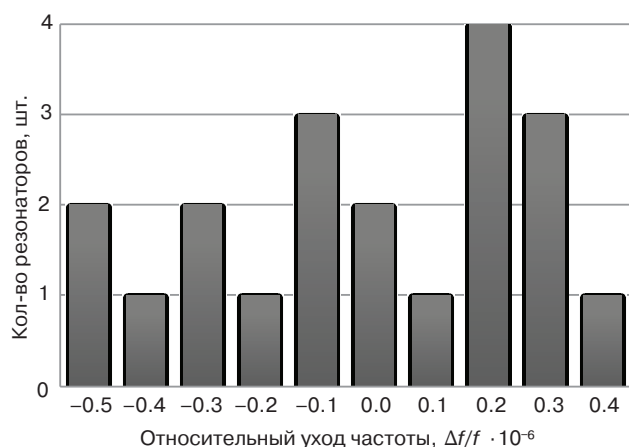
где  $f_{\text{DAC}}$  – номинальная частота резонанса резонатора, Гц;  $f$  – фактическая частота резонатора, Гц.

Для резонаторов в герметизированном корпусе применима размерность относительной частоты, которая выражается в относительных единицах. Чтобы уменьшить вероятность случайной ошибки, замеры резонаторов проводились в одних и тех же колодках (гнездах) установки «Динар».

Было выбрано 14 резонаторов с частотой 40 МГц, которые прошли термотренировку в течение 1000 ч при температуре  $+85^\circ\text{C}$ . Если допустить, что процессы старения в этих резонаторах прекратились, то распределение частот резонаторов за малый интервал времени можно использовать для определения погрешности частотоизмеряющей установки «Динар».



Замеры проводились при температуре +25 °С, низкой влажности воздуха и нормальном давлении. Сначала определялась частота каждого резонатора данной партии. После этого резонаторы извлекались из установки «Динар» и в течение 4 ч оставались при неизменных условиях<sup>2</sup>. Далее, при тех же условиях проводились повторные замеры частот. В итоге были получены относительные уходы частот, их распределение показано на рис. 3. При повторных замерах уходы частоты менялись, но их интервал не становился больше и находился в промежутке от  $-0.5 \cdot 10^{-6}$  до  $+0.4 \cdot 10^{-6}$ . Из проведенного опыта можно сделать вывод, что погрешность измерения частоты установки «Динар» не превышает  $\pm 0.5 \cdot 10^{-6}$ , т.е. абсолютная ошибка замеров частоты резонаторов с номинальной частотой 40 МГц на установке «Динар» не более чем 11 Гц.<sup>3</sup>

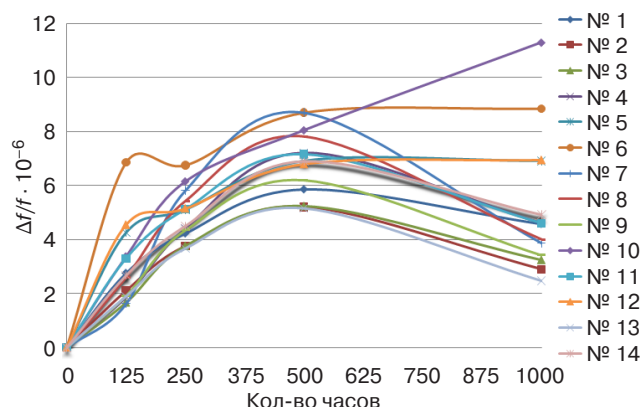


**Рис. 3.** Диаграмма распределения резонаторов по частотам

В соответствии с требованиями к надежности для резонаторов типа РК588 относительный уход частоты в процессе и после испытаний не должен превышать  $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ . Графики ухода частоты партии № 1 кварцевых резонаторов после выполнения операции термотренировки представлены на рис. 4. Все резонаторы прошли тест на отбраковку, уходы частот при этом не превысили  $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ , что говорит о высоком качестве изделий [7].

<sup>2</sup> Определение параметров кварцевых резонаторов. URL: [http://www.cqham.ru/ua1oj\\_2.htm](http://www.cqham.ru/ua1oj_2.htm), дата обращения: 17.11.2021. [Determination of the parameters of quartz resonators. URL: [http://www.cqham.ru/ua1oj\\_2.htm](http://www.cqham.ru/ua1oj_2.htm). Accessed November 17, 2021 (in Russ.).]

<sup>3</sup> Обозначение кварцевого резонатора на схеме: принцип работы и конструкция. URL: <https://math-nttt.ru/teoriya/kvarcevyj-rezonator-dlya-chego-nuzhen.html>, дата обращения: 15.11.2021. [Designation of a quartz resonator in the diagram: principle of operation and design. URL: <https://math-nttt.ru/teoriya/kvarcevyj-rezonator-dlya-chego-nuzhen.html>. Accessed November 15, 2021 (in Russ.).]



**Рис. 4.** График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре +85 °С каждого резонатора партии № 1 за 1000 ч

Из представленных графиков можно сделать вывод, что после замера «500 ч» у всех резонаторов уменьшился уход частоты, кроме резонатора № 10, у него уход частоты, наоборот, увеличился, но не превысил норму  $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ . Уход частоты резонаторов №№ 5, 6 и 12 уменьшился, резонаторы стабилизировались [8].

На основе данных, представленных на рис. 4, был рассчитан коэффициент старения резонаторов  $k$ , для этого было найдено среднее значение суммы относительных уходов частоты резонаторов в двух ключевых точках:

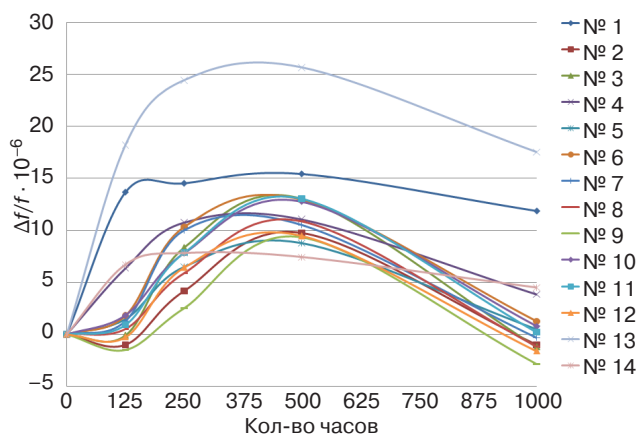
$$s = \frac{\frac{\Delta f_1}{f_1} + \frac{\Delta f_2}{f_2} + \dots + \frac{\Delta f_n}{f_n}}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество изделий;  $\frac{\Delta f_i}{f_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – уход частоты каждого отдельного резонатора [9].

Большинство исследователей и разработчиков кварцевых резонаторов, занимающихся прогнозом надежности, считают, что долговременное изменение частоты во времени носит экспоненциальный характер. На первом этапе изменение частоты носит криволинейный характер, на втором этапе наблюдается практически линейный участок с небольшим изменением частоты, которая стабилизируется и плавно опускается вниз. Обратим внимание на тот факт, что большинство изделий стабилизируется в течение 500 ч и выходит на свое верхнее значение частоты, после чего частота начинает плавно снижаться. Поэтому в качестве базовой для расчета коэффициента старения выбрана именно точка экстремума «500 ч». Далее для получения коэффициента старения результирующее среднее значение суммы относительных уходов частоты в конечной точке «1000 ч» делится на среднее значение суммы относительных уходов частоты в точке «500 ч»:

$$k_1 = \frac{5.18}{6.87} = 0.75.$$

Графики ухода частоты кварцевых резонаторов партии № 2 после выполнения операции термотренировки при температуре +125 °С представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре 125 °С каждого резонатора партии № 2 за 1000 ч

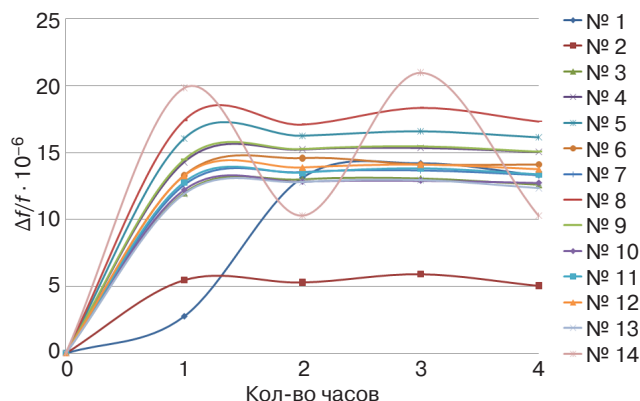
Из графиков на рис. 5 видно, что уходы частоты образцов №№ 2, 3, 5–12 в точке «125 ч» минимальны. Уходы частоты образцов №№ 4 и 14 в точке «125 ч» незначительно превышают  $+5 \cdot 10^{-6}$ , а уходы частоты образцов №№ 1 и 13 находятся рядом с предельным значением в  $+15 \cdot 10^{-6}$ . После замера в точке «500 ч» уход частоты у резонаторов постепенно уменьшается, но уходы частоты двух резонаторов №№ 1 и 13 выходят за пределы нормы  $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ , установленной в данном испытании. Следовательно, эти изделия не пройдут испытание на безотказность при такой высокой температуре<sup>4</sup>. По данным, представленным на рис. 5, также был посчитан коэффициент старения:

$$k_2 = \frac{2.3}{12.14} = 0.18.$$

Для того чтобы точнее оценить возможность сокращения времени проведения термотренировки путем увеличения температуры, нужно определить уходы частоты кварцевых резонаторов при температуре +125 °С в течение 100 ч при более частых замерах параметров. На основе полученных ранее результатов планировалось получить уход частот

кварцевых резонаторов таким же, как при температуре +85 °С в течение 250 ч.<sup>5</sup>

На рис. 6 показаны относительные уходы частоты резонаторов партии № 3 после термотренировки при температуре +125 °С с ежедневным замером частоты через каждые 24 ч в течение 100 ч.



**Рис. 6.** График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре 125 °С каждого резонатора партии № 3 за 100 ч

Относительный уход частоты практически всех резонаторов партии № 3 за первые сутки значительно выше, чем за остальной период, далее уход частоты стабилизируется. Уход частоты резонаторов за №№ 5, 8 и 14 незначительно превышает норму  $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ .

Таким образом, для стабилизации частоты кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах требуется минимум 24 ч при температуре +125 °С.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были сформулированы требования к надежностным характеристикам кварцевых резонаторов РК588 в миниатюрных керамических корпусах размером  $2.5 \times 2.0 \times 0.6$  мм при воздействии повышенной температуры окружающей среды +85 °С и +125 °С. Кроме того, разработаны требования по уходу частоты при воздействии повышенной температуры окружающей среды на данный тип кварцевого резонатора, созданного на основе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Оптимизирован способ термотренировки и установлены коэффициенты старения.

<sup>4</sup> Генераторы с кварцевыми резонаторами. URL: <https://inventori-steam.ru/elektroteoriya/kvarcevyj-generator-princip-raboty.html>, дата обращения: 20.11.2021. [Generators with quartz resonators. URL: <https://inventori-steam.ru/elektroteoriya/kvarcevyj-generator-princip-raboty.html>. Accessed November 20, 2021 (in Russ.).]

<sup>5</sup> Кварцевые резонаторы. Виды и применение. Устройство и работа. URL: <https://34rozetki.ru/svet/chto-takoe-kvarcevyj-rezonator.html>, дата обращения: 20.11.2021. [Quartz resonators. Types and application. Device and work. URL: <https://34rozetki.ru/svet/chto-takoe-kvarcevyj-rezonator.html>. Accessed November 20, 2021 (in Russ.).]

Обратим внимание на тот факт, что изделия партии № 1 и партии № 2 при воздействии высоких температур выходят на свое верхнее значение частоты в течение 500 ч, после чего частота резонаторов начинает плавно снижаться, поэтому в качестве базовой для расчета коэффициента старения выбрана именно точка экстремума [10].

Таким образом, расчетный коэффициент старения по результатам испытаний кварцевых резонаторов на безотказность для партии № 1 при температуре +85 °С составил  $k_1 = 0.75$ , а для партии № 2 при температуре +125 °С составил  $k_2 = 0.18$ . Отношение коэффициентов в ходе процессов старения составило:

$$d = \frac{k_1}{k_2} = \frac{0.75}{0.18} = 4.1. \quad (3)$$

Для данного типа пьезоэлемента размером  $1.5 \times 1.0$  мм при рабочей температуре +125 °С коэффициент старения ниже в 4 раза, чем при температуре +85 °С, что говорит о возможности применения резонатора РК588 в условиях повышенной температуры окружающей среды.

#### Вклад авторов

**М.И. Бойчук** – организация экспериментальных испытаний на базе АО «ЛИТ-ФОНОН»; создание плана-графика и подбор методов проведения испытаний; подготовка необходимого оборудования и

оснастки; системный анализ результатов; подготовка технического отчета.

**В.Е. Кривоногов** – проведение начальных и промежуточных замеров кварцевых резонаторов во время и после проведения испытаний; контроль соблюдения сроков испытаний.

**С.А. Микаева** – анализ технического отчета и результатов испытаний; упорядочивание данных, приведенных в работе; оформление и редактирование текста статьи; консультации по подбору и анализу литературы.

**Л.А. Васильева** – отбор кварцевых резонаторов на испытания; статистический анализ результатов испытаний; внесение полученных данных по уходам частоты резонаторов при повышенной температуре среды в технический отчет.

#### Authors' contribution

**M.I. Boychuk**—organizing experimental tests based on the LIT-FONON equipment, forming a schedule for tests, selecting the test methods, preparing the necessary equipment and tools, system analysis of the obtained results, and preparation of a technical report.

**V.E. Krivonogov**—carrying out initial and intermediate measurements of quartz resonators during and after tests and monitoring compliance with test deadlines.

**S.A. Mikaeva**—analysis of the technical report and test results, systematization of the data obtained, writing and editing the text of the article, and consultations on the selection and analysis of the literature used.

**L.A. Vasilieva**—selection of quartz resonators for tests, statistical analysis of the test results, and entering the data obtained on the frequency drift of the resonators at elevated ambient temperatures in the technical report.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойчук М.И. Влияние креплений на температурно-частотную характеристику резонаторов. *Компоненты и технологии*. 2011;9:188–190.
2. Бойчук М.И., Микаева С.А. Сборка кварцевых генераторов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2016;10:7–11.
3. Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А. Температурно-частотные характеристики резонаторов. *Автоматизация. Современные технологии*. 2019;73(8):343–348.
4. Бойчук М.И., Микаева С.А. Проведение испытаний и контроль электронной компонентной техники. В сб.: *Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике*. Сб. докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. М.: РТУ МИРЭА; 2019. Т. 2. С. 258–261.
5. Бойчук М.И., Власов К.В., Черпухина Г.Н. и др. *Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов*: Пат. РФ № 27122426. Заявка № 2019104435; заявл. 18.02.2019, опубл. 28.01.2020.
6. Хоменко И.В., Косых А.В. *Кварцевые резонаторы и генераторы*. Омск: Издательство ОмГТУ; 2018. 160 с.

#### REFERENCES

1. Boychuk M.I. Influence of fastenings on the temperature-frequency response of resonators. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2011;9:188–190 (in Russ.).
2. Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Build crystal oscillators. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*. 2016;10:7–11 (in Russ.).
3. Boychuk M.I., Mikaeva A.S., Mikaeva S.A. Temperature-frequency characteristics of the resonators. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2019;73(8):343–348 (in Russ.).
4. Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Testing and control of electronic component technology. In: *Computer science and technology. Innovative technologies in industry and informatics*. Russian scientific and technical conference with international participation. Collection of conference reports. Moscow: RTU MIREA; 2019. V. 2. P. 258–261 (in Russ.).
5. Boychuk M.I., Vlasov K.V., Cherpukhina G.N., et al. *Method of making thin crystal plates and thin crystalline elements*: Pat. RF 27122426. Publ. 28.01.2020 (in Russ.).
6. Khomenko I.V., Kosykh A.V. *Kvartsevye rezonatory i generatory (Quartz resonators and generators)*. Omsk: OmGTU; 2018. 160 p. (in Russ.).

7. Бойчук М.И., Васильева Л.А., Микаева С.А. Методика расчета надежности кварцевых резонаторов. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*. 2020;7(280):53–58. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.053-058>
8. Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Контроль спая пьезоэлектрических изделий. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*. 2020;9(282):20–24. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.020-024>
9. Белов А.А., Степанов А.В. *Описание задачи спецпрактикума. Кварцевые резонаторы*. М.: МГУ; 2012. 18 с. URL: <http://www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/9/99/KRR.pdf>
10. Горевой А.В., Лирник А.В. Измерение шумовых параметров резонатора на квази-ПАВ. В сб.: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. Материалы 25-й Международной Крымской конференции. В 2-х ч. Севастополь; 2015. Ч. 1. С. 900–901.
7. Boychuk M.I., Vasilyeva L.A., Mikaeva S.A. Method for calculating the reliability of quartz resonators. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal (s prilozheniem) = Handbook. An Engineering Journal with Appendix*. 2020;7(280):53–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.053-058>
8. Vasilyeva L.A., Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Control of piezoelectric products junction. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal (s prilozheniem) = Handbook. An Engineering Journal with Appendix*. 2020;9(282):20–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.020-024>
9. Belov A.A., Stepanov A.V. *Opisanie zadachi spetspraktikuma. Kvaritsevye rezonatory (Description of the task of the special practice. Quartz resonators)*. Moscow: MGU; 2012. 18 p. (in Russ.). Available from URL: <http://www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/9/99/KRR.pdf>
10. Gorevoi A.V., Lirnik A.V. Measurement of noise parameters of a resonator on a quasi-SAW. In: *25th International Crimean Conference of Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. Conference materials. In 2th parts. Sevastopol. 2015. Part 1. P. 900–901 (in Russ.).

## Об авторах

**Бойчук Максим Иванович**, к.т.н., преподаватель, кафедра электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); начальник службы контроля качества продукции – главный контролер, руководитель испытательной лаборатории АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1). E-mail: [bojchuk@mirea.ru](mailto:bojchuk@mirea.ru). <https://orcid.org/0000-0001-8217-4546>

**Кривоногов Владислав Евгеньевич**, инженер по качеству, АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1). E-mail: [kerri.41@mail.ru](mailto:kerri.41@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-6990-3713>

**Микаева Светлана Анатольевна**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [mikaeva\\_s@mirea.ru](mailto:mikaeva_s@mirea.ru). <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

**Васильева Любовь Александровна**, аспирант кафедры электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ведущий инженер по качеству АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1). E-mail: [vasiliewafonon@gmail.com](mailto:vasiliewafonon@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-0092-7549>

## About the authors

**Maksim I. Boychuk**, Cand. Sci. (Eng.), Teacher, Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Head of Product Quality Control Service – Chief Controller, Head of Testing Laboratory, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: [bojchuk@mirea.ru](mailto:bojchuk@mirea.ru). <https://orcid.org/0000-0001-8217-4546>

**Vladislav E. Krivonogov**, Quality Engineer, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: [kerri.41@mail.ru](mailto:kerri.41@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-6990-3713>

**Svetlana A. Mikaeva**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [mikaeva\\_s@mirea.ru](mailto:mikaeva_s@mirea.ru). <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

**Lyubov A. Vasilieva**, Postgraduate Student, Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Lead Quality Engineer, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: [vasiliewafonon@gmail.com](mailto:vasiliewafonon@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-0092-7549>