

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В МИНИАТЮРНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ С ЦЕЛЬЮ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

В эпоху развития интеллектуальных информационных технологий, систем обработки и передачи сигналов, навигационных систем и ракетостроения к источникам опорных колебаний предъявляются все более жесточенные требования. Большое значение приобретают малые габаритные размеры, малое время выхода на частоту после подачи электропитания, рабочий температурный диапазон и относительный уход частоты в интервале рабочих температур. Частота на выходе генератора во многом зависит от влияния климатических, механических и специальных факторов. Наиболее дестабилизирующим фактором является изменение температуры окружающей среды. Исходя из этого, обеспечение температурной стабильности частоты в широком диапазоне является актуальной задачей.

Для стабилизации частоты генераторов в радиотехнике, как правило, применяются кварцевые резонаторы. Кварц относится к группе пьезоэлектриков — анизотропных диэлектриков, в которых наблюдаются прямой и обратный пьезоэффекты. Использование кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать нам высокую стабильность частоты без усложнения схемы [1].

На предприятии АО «ЛИТ-ФОНОН» была создана технологическая цепочка, позволяющая произвести кварцевый резонатор в миниатюрном металлокерамическом корпусе с применением только российских комплектующих. Созданные кварцевые резонаторы в дальнейшем планируется применять в составе термокомпенсированных генераторов. Однако на первом этапе необходимо было провести анализ характеристик созданных изделий, а также возможность поддерживать стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ в широком интервале температур от -60 °C до $+85$ °C [2].

Проведенное исследование позволило выявить ряд недостатков, препятствующих получению стабильности частоты термокомпенсированных генераторов $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. В частности, уходы частоты кварцевых резонаторов в миниатюрных металлокерамических корпусах со временем эксплуатации при максимальной рабочей температуре $+85$ °C превышают значения $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, т.е. требуется дополнительная подстройка генераторов в процессе эксплуатации. Кроме того, некоторые российские комплектующие не оптимально подошли к созданному на базе АО «ЛИТ-ФОНОН» технологическому процессу, что в будущем для создания кварцевых резонаторов может существенно повлиять на выход годных. Стоит также отметить, что измерительная установка имеет погрешность измерения $\pm 5 \cdot 10^{-7}$. Такой разброс не позволил оценить стабильность частоты кварцевых резонаторов с необходимой точностью.

Ключевые слова: кварц, генератор, резонатор, термокомпенсация, металлокерамический корпус, кристаллический элемент, угол среза, стабильность частоты.

Важнейшим элементом, отвечающим за стабильность поддержания частоты в интервале рабочих температур, является кварцевый резонатор. В процессе разработки резонатора было принято решение использовать только российские комплекту-

ющие. Для изготовления пьезоэлемента резонатора был применен кварц фирмы АО «Южноуральский завод «Кристалл», г. Челябинск. Кристаллы выращивают в специальных анклавах, качество кварца соответствует требованиям стандарта МЭК

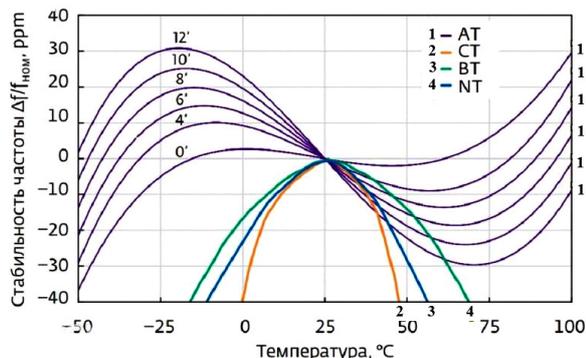


Рис. 1. Стабильность частоты AT, BT, CT и NT срезов кварца

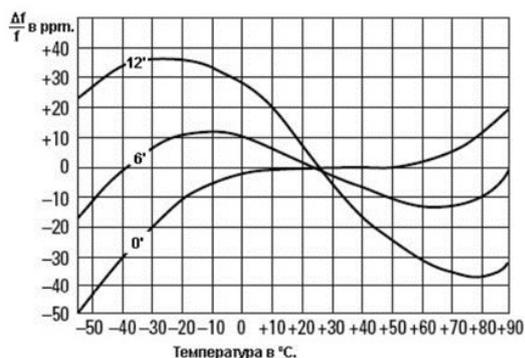


Рис. 2. Зависимость отклонения частоты от температуры окружающей среды для пьезоэлементов с AT-срезом (с разными углами)

(IEC) 60758 (2016). Так как одним из основных параметров кварцевых резонаторов в современных реалиях являются габариты, решено было использовать в работе металлокерамический корпус для поверхностного монтажа DLCC 8/4-3. В 2018 году на российском предприятии АО «Завод полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) при поддержке Министерства промышленности и торговли была запущена единственная в Российской Федерации технологическая линия по изготовлению металлокерамических корпусов для поверхностного монтажа.

При создании термокомпенсированного кварцевого генератора важную роль играет стабилизация частоты в широком интервале рабочих температур. В процессе разработки генератора планировалось достичь высокой стабильности $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ в широком интервале рабочих температур от минус 60 °C до + 85 °C. Для создания высокочастотных колебаний в диапазоне от нескольких единиц до десятков МГц самое массовое распространение нашел кристалл со структурой AT-среза. У пластин такого типа проявляется кубическая зависимость частоты от температуры с точкой перегиба графика в интервале от 25 °C до 30 °C. Данная температурная характеристика AT-среза способна показать стабильные результаты для кварцевых генераторов и резонаторов в широком интервале температур, в отличие от BT, NT и CT срезов, которые имеют уже параболическую зависимость на температурно-частотном графике (рис. 1). Параболическая зависимость не позволит эксплуатировать кварцевые резонаторы в широком интервале рабочих температур и вызовет нестабильную работу пьезоэлектрического колебательного контура [3].

За счет своей твердости и упругости кварцевые пластинки имеют резонансные свойства: чем меньше толщина пластины, тем сильнее они проявляются. Эффект напрямую зависит от расположения кристаллографических осей относительно самой пластины. Формы кристаллических срезов, в последующем основополагающего элемента кварцевого резонатора, могут быть как круглыми и линзообразными, так и квадратными и прямоугольными.

Одноповоротный AT-срез позволяет кварцевой пластине работать за счет толщинно-сдвиговых колебаний в частотном диапазоне ультракоротких волн, в частности от 400 кГц до 40 МГц (по 1-й гармонике). За счет этого AT-срез приобрел широкое применение в радиоэлектронике. Несомненным положительным показателем является работа данного среза в большом температурно-частотном интервале от -60 °C до + 85 °C (рис. 2), сохраняя стабильность частоты. Более 90 % генераторов на базе кварцевого пьезоэлектрика выполнено в мире с применением AT-среза [4]. Стоит выделить его основные признаки:

- высокочастотные механические колебания пластины происходят на несущей частоте, но также и на нечетных обертонах;
- при перпендикулярном расположении пластины относительно оси Y в кристаллической структуре кварца ее угол составляет 35 °15' от заданной вертикальной оси Z с допустимым пределом расхождения, составляющим порядка 15'.

Зависимость изменения частотной характеристики от температуры окружающей среды выражена в виде полинома третьей степени, значение коэффициента которого основано на изменении действительного угла среза от его исходного положения 35 °15'. Значение точки при переходе нулевого значения относительного изменения частоты $\frac{\Delta f}{f}$ начинается при температурном значении в районе точки 25 °C.

Для изготовления пьезоэлектрических приборов с высокой частотой выходного сигнала важнейшим параметром, от которого зависит частотная характеристика элемента, является толщина изготовленной кристаллической пластины.

В настоящее время применение высокоточной технологии обработки кристаллических элементов в промышленных масштабах производится на искусственно выращенных кристаллах кварца, имеющих уже сформированную подходящую кристаллическую структуру [5].

Классический способ изготовления плоских кристаллических элементов включает в себя поэтапный процесс операции резки кварца на крупные заготовки пьезоэлектрических элементов, из которых затем получают кварцевые ориентированные секции требуемых размеров. Затем кварцевые ориентированные секции на специальном станке с помощью тонких натянутых металлических струн нарезаются на особо тонкие пластины (минимальная толщина 200 мкм), что позволяет получить необходимую толщину заготовок пластины для создания резонаторов высокой частоты. Важное значение уделяется механической шлифовке материала для достижения требуемых размеров. С применением химического травления появляется возможность довести более простые кристаллические элементы до сверхмалой толщины, которую крайне сложно реализовать способом механической обработки.

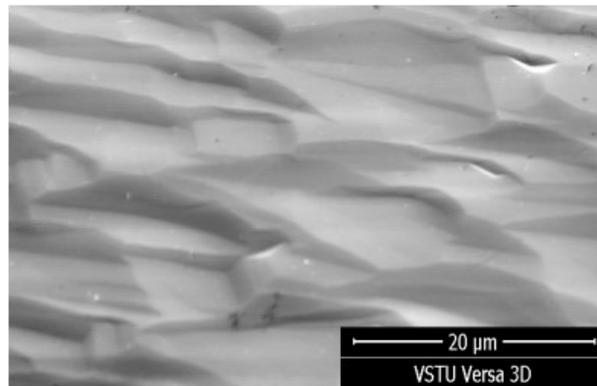
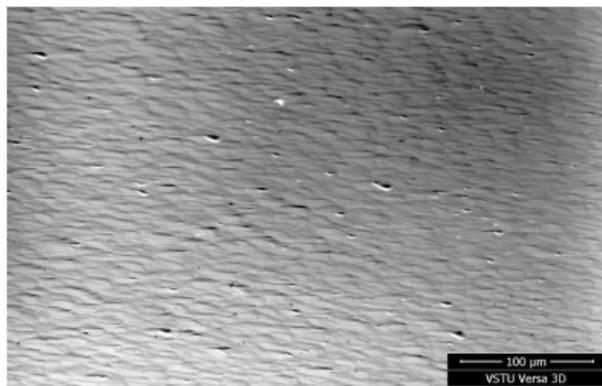


Рис. 3. Фотографии поверхности кварца после полирования с применением абразивной суспензии на основе оксида церия

Для получения сверхтонких материалов зачастую используют химико-динамическое травление в полирующих химическо-абразивных растворах, с помощью чего достигается устранение недостатков на поверхности элемента, таких как микроцарапины, изгибы и неровности.

В результате того, что кристаллические элементы в силу своей высокой твердости также обладают и хрупкостью, а сам технологический процесс резки, полирования и доведения материала до сверхтонкого состояния является технически сложным и трудоемким, конечное количество кварцевых пластин составляет порядка 50 %. Операция травления широко распространена на производственных предприятиях, однако процесс обработки материала, как правило, завершается шлифовкой кварцевой пластины. В таком случае готовый продукт имеет гораздо меньшие экономические затраты и больший выход готовой продукции, частотные характеристики которой по-прежнему остаются на высоком уровне добротности выходного сигнала.

После нарезки кристалла кварца на бруски, а затем и на тонкие заготовки, отшлифованные с применением первоначальной грубой пасты для устранения поверхностных недостатков, проводят ряд испытаний на калибровочном оборудовании. С помощью рентгеновского дифрактометра определяют точные частотные характеристики кварцевой пластины. Измерив несущую частоту кварцевой пластины, заготовки распределяются на группы, показатели которых находятся в одном интервале, а затем повторно дорабатываются на высокоточном шлифовальном оборудовании с применением микропорошков более высокого класса шероховатости. Характеристики будущего резонатора во многом зависят от геометрии кварцевой пластины. Показатели кварцевых пластин можно улучшить путем шлифования фасок на гранях прямоугольной заготовки.

Операции по шлифованию срезов для обеспечения заданной толщины пластины производят на двухсторонних доводочно-полировальных станках с применением абразивных суспензий на основе оксида церия, а также электрокорунда и синтетического алмаза. Партия пластин устанавливается в концентрически расположенные гнезда — кассеты, данная установка помещается между нижним и верхним полировальным диском, а затем автоматически добавляется полировальная суспензия. На производственном оборудовании предприятия АО «ЛИТ-ФОНОН» активно применяется первоначальное шлифование микропорошковой суспензией

M10, зернистость которой составляет от 7,2 до 10 мкм, а затем доводка поверхности с применением зернистости M7 и M5, класс точности последней достигает 2,2–3,0 мкм с шероховатостью обработанной поверхности до 0,1 мкм [6].

Понижение шероховатости поверхности пластин, на которые в последующем будут нанесены электроды, способствует повышению добротности будущего сигнала. Добротность в колебательном контуре определяется отношением реактивной энергии к сумме энергетических потерь за период механических колебаний, что является основополагающим фактором при определении коэффициента полезного действия системы. Именно благодаря устранению шероховатости на поверхности кварца и достигается высокий показатель добротности системы. По завершению калибровки пластины кварца повторно проходят через рентгенометр для установления конечных частотных характеристик.

На рис. 3 представлены электронные снимки поверхности кварцевой пластины после абразивной обработки [7].

По завершению калибровки и проверки на рентгеновском дифрактометре пластины кварца загружаются в специальную камеру для напыления электрода. На отполированные стороны пластин накладывается трафарет, который формирует итоговую форму и размер электрода на кварце. Следующим этапом идет напыление тонкого слоя серебра (Ag) и слоя хрома (Cr) толщиной 0,1 мкм. Доказано, что от толщины пленки хрома зависят различные свойства покрытия. Так, например, при толщине больше 1 мкм хром обеспечивает адгезию Ag на поверхности кварца и способен замедлять тепловое рассеивание атомов этих материалов на поверхности электрода при слое менее 0,1 мкм и практически не влияет на электропроводимость основного слоя серебра.

Реакции на поверхности электрода способствуют образованию новых твердых растворов $Cr + Ag$, которые способны обеспечить устойчивость металла к тепловому рассеиванию, тем самым сохраняя стабильность в непрерывной работе на десятки лет.

Нужно отметить, что при изготовлении кварцевых пьезоэлементов были применены только российские комплектующие и материалы.

В результате исследования тонких кварцевых пластин было установлено, что можно добиться необходимой стабильности частоты пьезоэлемента без нанесения слоя хрома.

Выбор металлокерамического корпуса был сделан в пользу DLCC 8/4-3 производства АО «Завод

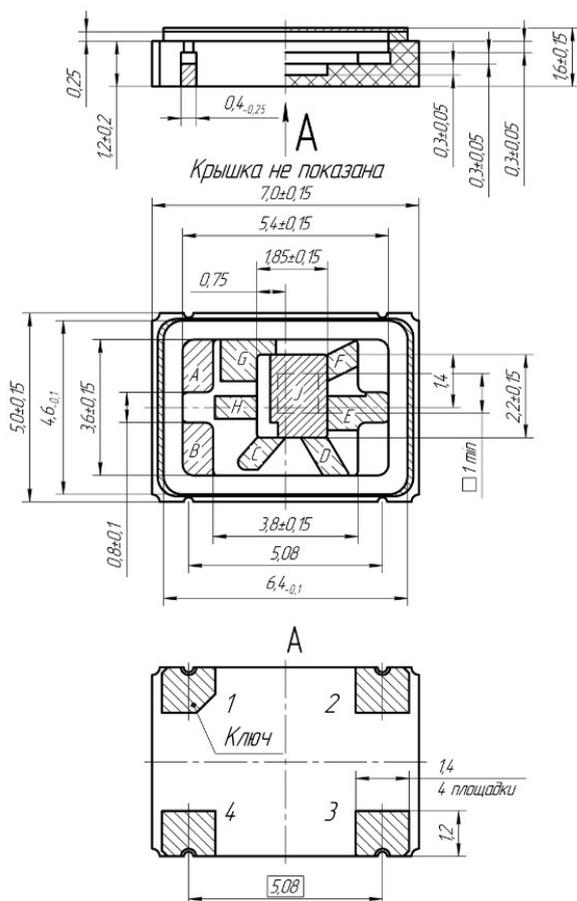


Рис. 4. Внешний вид корпуса DLCC 8/4-3

полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) (рис. 4), поскольку технология изготовления полупроводникового кристаллического пьезоэлемента в похожем корпусе корейской фирмы Куосега была ранее отработана на производстве АО «ЛИТ-ФОНОН».

На производственном участке была произведена проверка пригодности металлокерамического корпуса DLCC 8/4-3, состоящего из основания и крышки, для изготовления кварцевых резонаторов. Металлокерамические корпуса соответствовали требованиям конструкторской документации завода-изготовителя.

Для отработки технологических процессов была запущена партия резонаторов в количестве 30 штук по конструкторско-технологической документации резонаторов РК486 на частоту 25 МГц. В процессе отработки техпроцессов выявлены следующие недостатки корпусов DLCC 8/4-3:

- отсутствие прямоугольной формы основания;
- отсутствие плоскостности и прямолинейности наружных боковых поверхностей, разброс по допускам габаритных размеров металлокерамических корпусов в одной партии, превышающий требования технологического оборудования;
- радиус скругления контура крышек ($r = 0,3$ мм), приводящий к нарушениям требований конструкторской документации на резонатор РК486 (аналог изготавливаемого резонатора);
- отсутствие повторяемости топологии и контуров контактных площадок;
- неравномерность структуры золотого покрытия контактных площадок.

В процессе производства резонаторов использовалось технологическое оборудование:

- FINEPLACER femto (монтаж кристаллов);
- Ion milling system for ceramic SMD oscillator GE-PMS 400 (плазменная настройка резонаторов);
- Parallel seam sealer NS-1380B (герметизация генераторов);
- МиниМаркет 2 (лазерная маркировка).

На операции герметизации блоков резонаторов роликовой сваркой выход годных составил 0 %. Внешний вид не соответствовал требованиям конструкторской документации ШКЖГ.433514.002 для резонаторов РК486. Однако резонаторы оказались герметичны. Электрические параметры соответствовали требованиям технических условий РК486, было принято решение продолжить исследование установленной партии. Из 30 штук резонаторов, запущенных в производство до предъявительских испытаний дошли 14 штук. Таким образом, выход годных резонаторов составил 46,6 %, если не учитывать внешний вид изделий.

Для стабилизации частоты резонаторов было принято решение провести термотренировку при температуре + 85 °С в течение 1000 часов.

Термотренировка — один из важных этапов изготовления кварцевых резонаторов. Термотренировка — это выдержка резонатора при высокой температуре на протяжении определенного времени. Данная технологическая операция предназначена для создания искусственного условия старения кварцевых резонаторов.

Процесс старения кварцевого резонатора — это комплекс разных физических процессов, которые с течением времени приводят к изменению резонансной частоты изделия. Поскольку большинство процессов стремятся вернуться в состояние термодинамического равновесия, то после их завершения резонатор переходит в стабильное состояние, а уходы частоты становятся незначительными, допустимыми для большинства приборов. Процесс старения считается сложным и многоэтапным, поэтому режим термотренировки подбирался экспериментально, отталкиваясь от условий эксплуатации определенного типа кварцевого резонатора.

Чаще всего термотренировка занимает больше времени, чем сам процесс изготовления резонатора. Большинство процессов, описывающих старение кварцевого резонатора, не могут позволить оценить поведение каждого изделия и сделать расчет наиболее подходящих режимов [7].

Кварцевые резонаторы подвергаются термотренировке на конечном этапе производства в специальной температурной камере. Одним из основных источников дестабилизации частоты является процесс старения. Это процесс изменения частоты кварцевого резонатора во времени при стабильных условиях работы вследствие необратимых изменений свойств кристаллов, крепежных элементов и связанных с ними устройств. При воздействии процесса старения в кварцевых резонаторах можно наблюдать несколько характерных особенностей:

- большее количество процессов старения описывается экспоненциальным законом уходов частоты резонаторов во времени. Плавный ход кривой старения нарушается несистематичностью, её величина и характер зависят от типа резонатора;
- скорость старения увеличивается с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры;
- относительный уход частоты при старении и его характер зависят от свойств инертного газа в корпусе, где находится кварцевый пьезоэлемент.

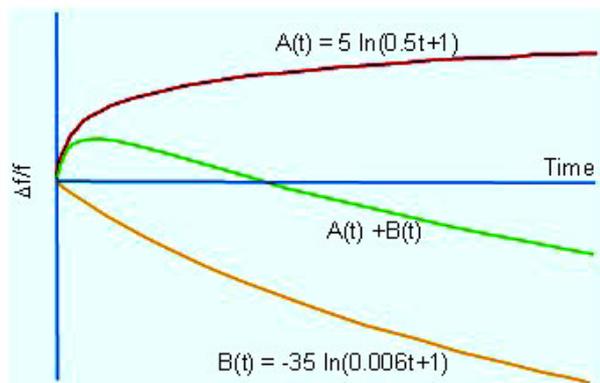


Рис. 5. Типичные изменения частоты со временем

Стоит отметить, что скорость изменения частоты во времени при постоянной температуре окружающей среды неодинакова. Наибольшая скорость изменения частоты наблюдается в течение первых нескольких недель, затем она резко уменьшается [8]. 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 линейный участок с небольшими изменениями частоты. Дж. Р. Виг считает, что существует три основных типа изменения частоты со временем, представленных на рис. 5 [9].

Для изучения процессов старения изготовленные на производстве АО «ЛИТ-ФОНОН» кварцевые резонаторы РК486 в количестве 14 штук установили на термотренировку при максимальной рабочей температуре + 85 °С, для того чтобы определить время стабилизации частоты и выйти практически на линейный участок зависимости $\Delta f/f(t)$. Замеры частоты проводились при следующих временных значениях: 0, 125, 250, 500, 750, 1000 часов.

Надо отметить, что замеры частоты резонаторов производились на стенде температурного контроля «Динар». Установка позволяет провести замеры частот резонаторов в интервале от 1 Гц до 100 МГц. Тем не менее точность замера уменьшается с увеличением частоты резонаторов. Для того чтобы избежать ошибки в расчетах отклонения частоты от нормы, нужно было определить погрешность замеров.

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 колодцах (гнездах) установки «Динар».

Замеры проводились с температурой + 25 °С, при низкой влажности воздуха и нормальном давлении. Первые замеры проводились для того, чтобы определить частоту каждого резонатора данной партии. После того как были проведены замеры, резонаторы извлекались из установки «Динар», и в течение 4-х часов оставались при неизменных условиях. Далее с теми же условиями проводились повторные замеры частот. В итоге были получены относительные уходы частот: их распределение изображено на рис. 6. С повторными замерами уход частоты меняется, но их интервал не становится больше. Размер уходов частоты резонаторов

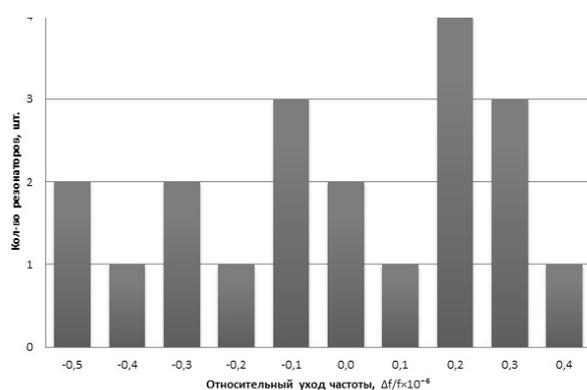


Рис. 6. Диаграмма распределения резонаторов по частотам

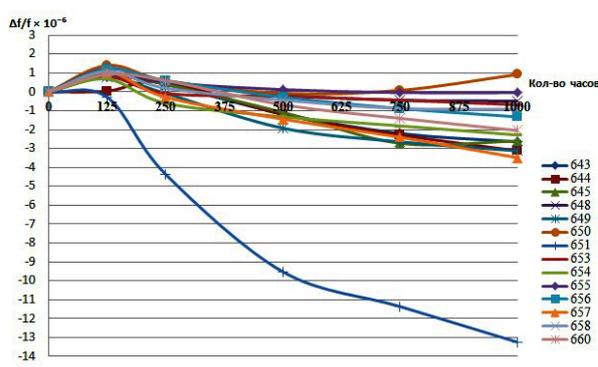


Рис. 7. График зависимости относительного ухода частоты от времени

находится 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 $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. Полученный результат означает, что абсолютная ошибка замеров частоты резонаторов с номинальной частотой 25 МГц на установке «Динар» не превышает 12,5 Гц.

Результаты измерений параметров кварцевых резонаторов в процессе испытаний за 1000 часов приведены на рис. 7. По результатам испытаний можно сделать вывод, что стабилизация резонаторов наступает в точке 250 часов. Резонатор № 651 имеет существенное отличие в поведении от остальной партии изделий и не пригоден для термокомпенсации. Разброс по частоте остальных резонаторов за 1000 часов колеблется в диапазоне от $-4 \cdot 10^{-6}$ до $+1 \cdot 10^{-6}$. Т.е. если применять данный тип резонаторов в составе термокомпенсированных генераторов однократного программирования с помощью полинома 3-го или 5-го порядка будет достаточным, чтобы получить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. Однако потребуются подстройка частоты в процессе эксплуатации подачей напряжения на вход коррекции.

Для того чтобы определить разбросы по частоте в партии испытываемых резонаторов в части вариации коэффициентов полиномов, было проведено пятикратное измерение температурно-частотной характеристики (далее по тексту — ТЧХ) каждого изделия в диапазоне от -60 °С до $+85$ °С. В камере термостата устанавливалось нижнее температурное значение -60 °С с выдержкой 15 минут. Повышая температуру в камере термостата через каждый 1 °С, производились измерения частоты. Максимальное относительное изменение частоты резона-

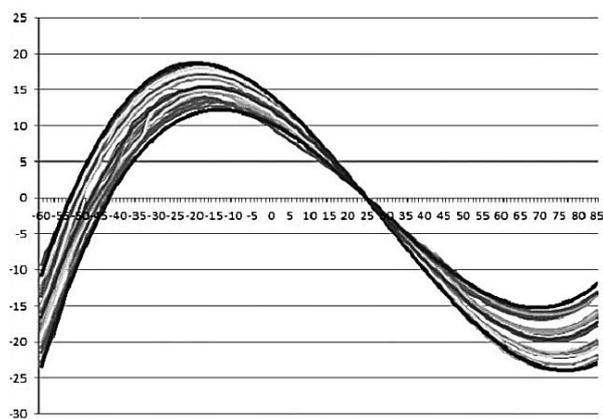


Рис. 8. Полученные результаты измерения ТЧХ кварцевых резонаторов РК486

Таблица 1

Среднее, максимальное и минимальное значение относительного ухода частоты резонаторов от изменения температуры

Т °С	сред.	макс.	мин.
-60	-16,51	-9,35	-22,88
-50	-3,17	2,67	-8,21
-40	6,56	11,17	2,47
-30	12,81	17,21	8,73
-20	15,23	18,77	11,74
-10	14,85	17,5	12,64
0	12,18	14,16	9,73
10	8,06	9,27	6,2
20	2,83	3,21	2,12
25	0	0	0
30	-2,9	-3,37	-2,3
40	-8,62	-9,95	-6,72
50	-13,77	-16,17	-11,28
60	-17,61	-20,9	-14,33
70	-19,5	-23,57	-15,46
80	-18,79	-23,49	-13,84
85	-17,29	-22,52	-11,94

торов в интервале температур определяют по формулам:

$$\frac{\Delta f_1}{f_p} = \frac{f_{\max} - f_p}{f_p},$$

$$\frac{\Delta f_2}{f_p} = \frac{f_{\min} - f_p}{f_p},$$

где f_{\max} , f_{\min} — наибольшее и наименьшее значения частоты резонатора в интервале температур;

f_p — измеренное значение рабочей частоты резонатора при температуре $25 \pm 0,5$ °С [10].

Полученные результаты измерения ТЧХ приведены на рис. 8. Получены средние, максимальные и минимальные значения разбросов по углу среза для резонаторов АТ-среза, подходящих для термокомпенсации. Результаты измерения относительно-

го ухода частоты от изменения температуры приведены в табл. 1.

Выводы

1. Металлокерамические корпуса фирмы АО «Завод полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) не оптимально подходят для существующего технологического процесса на предприятии АО «ЛИТ-ФОНОН». Разброс по допускам габаритных размеров корпусов в одной партии превышает требования технологического оборотования.

2. Выход годных резонаторов составил 46,6 %, если не брать в расчет требования, установленные к внешнему виду, т.е. достаточно низкий.

3. Погрешность измерения стенда температурного контроля «Динар» не превышает $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. Такая высокая погрешность не позволяет оценить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, необходимо приобретение более точной прецизионной установки для измерения ТЧХ в заданном диапазоне, если в дальнейшем применять изделия в составе термокомпенсированных генераторов.

4. Разброс по частоте изготовленных резонаторов в процессе термотренировки за 1000 часов при температуре $+85$ °С изменяется в диапазоне от $-4 \cdot 10^{-6}$ до $+1 \cdot 10^{-6}$. Т.е. для данного типа резонаторов однократное программирование с помощью полинома 3-го или 5-го порядка будет недостаточным, чтобы получить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, потребуется коррекция частоты в процессе эксплуатации.

5. Оптимальные значения ТЧХ резонаторов для применения в термокомпенсированных кварцевых генераторах должны находиться в зоне между темно-серыми кривыми линиями (рис. 8), которые характеризуют коридор возможного технологического разброса по углу среза. На этапе изготовления кварцевых резонаторов надо стремиться достичь значения ТЧХ близкие к средней частоте (центральная серая линия на рис. 8).

Библиографический список

- Косых А. В. Источники высокостабильных колебаний на основе кварцевых генераторов с цифровой термокомпенсацией: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2006. 508 с. EDN: SUJLKL.
- Бойчук М. И. Цифровой термокомпенсированный кварцевый генератор в керамическом корпусе для поверхностного монтажа: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 164 с.
- Косых А. В., Рой А. А., Мурашко Д. Н. Моделирование реального температурного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру // Омский научный вестник. 2001. № 14. С. 139–143.
- Бойчук М. И. Влияние креплений на температурно-частотную характеристику резонаторов // Компоненты и технологии. 2011. № 9 (122). С. 188–190. EDN: NYBLYL.
- Бойчук М. И., Грузиненко В. Б. Требование к качеству пьезоэлектрических монокристаллов кварца в производстве высокочастотных и микроминиатюрных резонаторов ВЧ- и СВЧ-диапазона // Компоненты и технологии. 2011. № 3 (116). С. 146–147. EDN: NCWVMT.
- Пат. 27122426 Российская Федерация, МПК H03H 3/02. Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов / Бойчук М. И., Власов К. В., Черпухина Г. Н. и [и др.]. № 2019104435; заявл. 18.02.2019; опубл. 28.01.2020. Бюл. № 4. 8 с.
- Бойчук М. И., Глазунова Ю. А., Пашков С. С. [и др.]. Исследование долговременной стабильности кварцевых резонаторов // Компоненты и технологии. 2022. № 2 (247). С. 14–18. EDN: CDZQFD.

8. Бойчук М. И., Кривоногов В. Е., Микаева С. А. [и др.]. Исследование надежных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах // Russian Technological Journal. 2022. № 10 (2). 43–50. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50. EDN: AJBNFO.

9. Vig J. R. Quartz Crystal Resonators and Oscillators. New Jersey: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2004. 305 p. URL: https://docs.amnuts.ru/eevblog.docs/eBooks/quartz_crystal_resonators_and_oscillators___for_frequency_control_and_timing_applications.pdf (дата обращения: 15.09.2023).

10. Хоменко И. В., Косых А. В. Кварцевые резонаторы и генераторы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. 159 с. ISBN 978-5-8149-2583-1.

БОЙЧУК Максим Иванович, кандидат технических наук, начальник службы контроля качества продукции — главный контролер, руководитель испытательной лаборатории АО «ЛИТ-ФОНОН»,

г. Москва; старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Современные системы радиосвязи» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 5576-1384

AuthorID (РИНЦ): 873302

ORCID: 0000-0001-8217-4546

Адрес для переписки: boychukmi@gmail.com

Для цитирования

Бойчук М. И. Исследование кварцевых резонаторов в миниатюрных металлокерамических корпусах с целью дальнейшего применения в термокомпенсированных генераторах // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 135–143. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-135-143.

Статья поступила в редакцию 19.10.2023 г.

© М. И. Бойчук

STUDY FOR QUARTZ RESONATORS IN MINIATURE METAL-CERAMIC PACKAGE FOR FURTHER USE IN TEMPERATURE-COMPENSATED OSCILLATORS

With the advent of new technologies, the requirements for the sources of reference vibrations are becoming more stringent. They must be compact, quickly reach frequency, operate in a wide temperature range and have a small relative frequency drift in the operating temperature range.

Changes in ambient temperature are the most destabilizing factor for the oscillator output frequency. Ensuring frequency stability over a wide temperature range is a pressing task.

Thermal compensation allows increasing frequency stability over a wide range of operating temperatures. This is achieved by compensating for the effect of the destabilizing factor on the generator so that the frequency drift tends to zero as the temperature changes. Temperature-compensated quartz oscillators are highly stable and have a short readiness time. However, to create generators with a frequency stability of $\pm 0,1$ ppm, imported components are required, which makes their production difficult in modern conditions.

A technological chain is created at the JSC «LIT-PHONON», which allows producing a quartz resonator using only Russian components. The goal is to use these resonators in temperature-compensated oscillators with frequency stability of $\pm 0,1$ ppm. However, the analysis showed that the resonators have problems with frequency drift over time during operation at a maximum operating temperature of $+ 85$ °C. Additional adjustment of generators during operation is required. It is also revealed that some Russian components are not ideally suited to the developed technological process, which may negatively affect the yield of suitable products. The measuring setup also has an error of $\pm 0,5$ ppm, which does not allow an accurate assessment of the frequency stability of the resonators.

Keywords: quartz, oscillator, resonator, temperature-compensation, metal-ceramic package, crystal element, cut-off angle, frequency stability.

References

1. Kosykh A. V. Istochniki vysokostabil'nykh kolebaniy na osnove kvartsevykh generatorov s tsifrovoy termokompensatsiyey [Sources of highly stable oscillations based on quartz oscillators with digital temperature compensation]. Omsk, 2006. 508 p. EDN: SUJLKL. (In Russ.).
2. Boychuk M. I. Tsifrovoy termokompensirovanny kvartsevyy generator v keramicheskom korpuse dlya poverkhnostnogo montazha [Digital temperature compensated crystal oscillator in ceramic surface mount housing]. Moscow, 2019. 164 p. (In Russ.).
3. Kosykh A. V., Roy A. A., Murashko D. N. Modelirovaniye real'nogo temperaturnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu [Modeling of real temperature impact on radio electronic equipment] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2001. No. 14. P. 139–143. (In Russ.).
4. Boychuk M. I. Vliyaniye krepleniy na temperaturno-chastotnuyu kharakteristiku rezonatorov [The effect of fasteners on the temperature-frequency response of resonators] // Komponenty i tekhnologii. *Components and Technologies*. 2011. No. 9 (122). P. 188–190. EDN: NYBLYL. (In Russ.).
5. Boychuk M. I., Gruzinenko V. B. Trebovaniye k kachestvu pyezoelektricheskikh monokristallov kvartsa v proizvodstve

6. Patent 27122426 Russian Federation, IPC H03H 3/02. Sposob izgotovleniya tonkikh kristallicheskikh plastin i tonkikh kristallicheskikh elementov [Method of making thin crystalline plates and thin crystalline elements] / Boychuk M. I., Vlasov K. V., Cherpukhina G. N. [et al.]. No. 2019104435. (In Russ.).
7. Boychuk M. I., Glazunova Yu. A., Pashkov S. S. [et al.]. Issledovaniye dolgovremennoy stabil'nosti kvartsevykh rezonatorov [Study of long-term stability of quartz resonators] // Komponenty i tekhnologii. *Components and Technologies*. 2022. No. 2 (247). P. 14–18. EDN: CDZQFD. (In Russ.).
8. Boychuk M. I., Krivonogov V. E., Mikayeva S. A. [et al.]. Issledovaniye nadezhnostnykh kharakteristik kvartsevykh rezonatorov v miniatyurnykh keramicheskikh korpusakh [Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages] // Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal. *Russian Technological Journal*. 2022. No. 10 (2). P. 43–50 DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50. EDN: AJBNFO. (In Russ.).

9. Vig J. R. Quartz Crystal Resonators and Oscillators. New Jersey: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2004. 305 p. URL: https://docs.amnnuts.ru/eevblog.docs/eBooks/quartz_crystal_resonators_and_oscillators_for_frequency_control_and_timing_applications.pdf (accessed: 15.09.2023). (In Engl.).

10. Khomenko I. V., Kosykh A. V. Kvaritsevyye rezonatory i generatory [Quartz resonators and oscillators]. Omsk, 2018. 159 p. ISBN 978-5-8149-2583-1. (In Russ.).

BOYCHUK Maxim Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Product Quality Control Service, Chief Inspector, Head of the Testing Laboratory of JSC «LIT-PHONON», Moscow; Senior Researcher at

the Scientific Research Laboratory «Modern Radio Communication Systems», Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 5576-1384

AuthorID (RSCI): 873302

ORCID: 0000-0001-8217-4546

Correspondence address: boychukmi@gmail.com

For citations

Boychuk M. I. Study for quartz resonators in miniature metal-ceramic package for further use in temperature-compensated oscillators // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 135–143. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-135-143.

Received October 19, 2023.

© **M. I. Boychuk**