

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С МОНОТОННЫМИ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

RECEIPT QUARTZ RESONATOR WITH MONOTONIC TEMPERATURE FREQUENCY CHARACTERISTICS

K. Matveev

Annotation

The article deals with one of the most important parameters of quartz piezoelectric resonators – temperature–frequency characteristics (TFC) monotony which depends on the quality of the production of piezoelectric quartz, as well as on the type of product design. The study revealed that most of the ways that reduce the likelihood of frequency jumps lead to some deterioration in the resonator parameters.

Keywords: Quartz resonator, harmonica, nonmonotony, operating fluctuation.

Матвеев Кирилл Евгеньевич

Аспирант, Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

Аннотация

В статье рассматривается один из самых важных параметров кварцевых пьезоэлектрических резонаторов – монотонность температурно-частотных характеристик (ТЧХ), зависящая от качества используемого при производстве пьезокварца, а также от вида конструкции изделия. В результате проведенного исследования было выявлено, что большинство способов, уменьшающих вероятность появления перескоков частоты, приводят к некоторому ухудшению параметров резонаторов.

Ключевые слова:

Кварцевый резонатор, гармоника, немонотонность, рабочее колебание.

Проблема немонотонности температурно-частотных характеристик (ТЧХ) кварцевых резонаторов известна уже много лет [1, 4].

Наиболее выраженным эффектом в кварцевых генераторах является скачок частоты в относительно узком интервале температур ($0,1^\circ\text{C} \div 3^\circ\text{C}$), который может варьироваться от $\Delta f/f = 5 \cdot 10^{-7}$ до $30 \cdot 10^{-6}$. Также возможны аномалии ТЧХ и в более широком интервале температур: от 5°C до 25°C [6].

С такими аномалиями столкнулись также и отечественные разработчики [2]. Во время испытаний на полигоне при температуре $t = -18^\circ\text{C}$ произошел отказ аппаратуры. При незначительном изменении температуры ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) работоспособность восстанавливалась. В результате анализа было установлено, что именно при этой температуре происходит срыв колебаний кварцевого резонатора.

В следствие всего этого были проведены исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резонаторов в интервале температур, в которых было установлено, что при срыве генерации рабочей частоты происходит появление или резкое возрастание амплитуды колебаний находящихся вблизи гармонических частот. На-

пример, при работе резонатора на 5-ой гармонике возникали составляющие вблизи 1, 2, 3, 4, 6 и 7 гармоник а число одновременно работающих частот могло колебаться от трех до пяти. Наиболее часто увеличивалась активность 2-ой и 3-ей гармоник. В сумме эти частоты дают значение частоты 5-ой гармоники.

В работе [3] получены схожие выводы на основании исследований резонаторов с частотами 75 МГц, работающих на 5-ой гармонике. В спектре сигнала в момент уменьшения активности рабочего колебания генератора возникали составляющие с частотами четных и нечетных гармоник.

Для того, чтобы выявить возможную взаимосвязь между связью рабочей частоты с нежелательными колебаниями изгиба и сдвига по толщине и немонотонностью ТЧХ были проведены исследования АЧХ резонаторов в интервале рабочих температур.

На **рис. 1** представлены АЧХ резонатора, работающего на первой гармонике на частоте $f_p = 20000$ кГц, измеренные при температурах 25°C , 30°C и 35°C . При измерении ТЧХ в интервале температур от 25°C до 90°C этот резонатор имел несколько перескоков частоты (**рис. 2**).

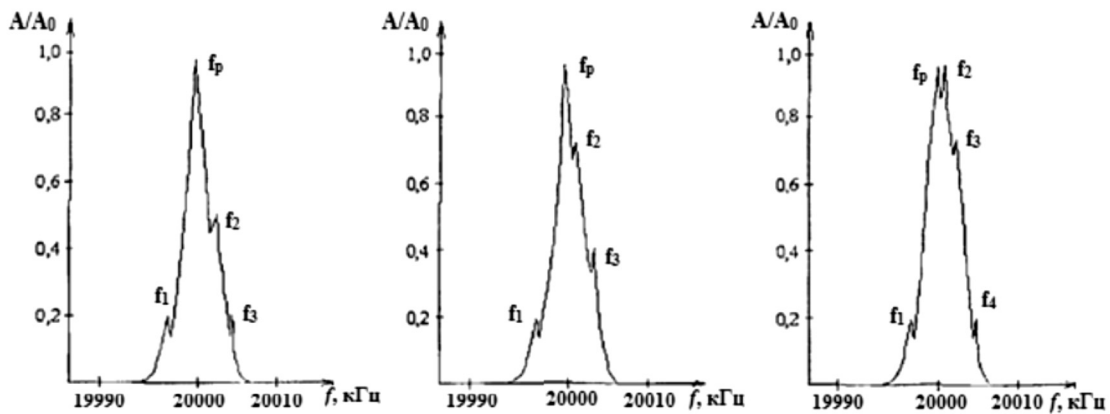


Рисунок 1. Амплитудно-частотные характеристики резонатора частотой $f_p = 20000$ кГц при температурах 25°C (а), 30°C (б) и 35°C (в).

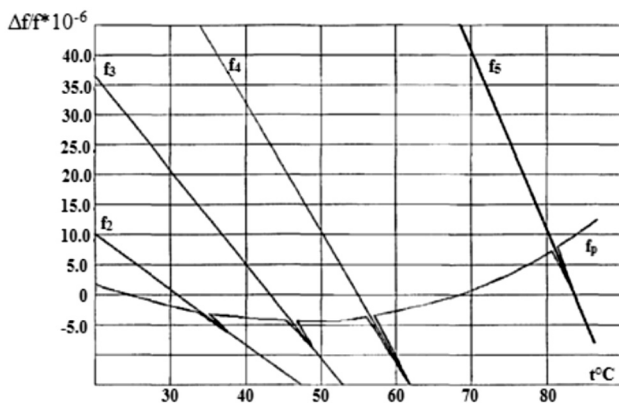


Рисунок 2. ТЧХ рабочего колебания 1-ой гармоники и паразитных колебаний f_2, f_3, f_4, f_5 .

На скатах АЧХ резонатора при температуре 25°C наблюдается три небольших колебания f_1, f_2, f_3 (рис. 1а).

При температуре 25°C частота колебания f_1 на 4 кГц меньше частоты рабочего колебания f_p . Частоты колебаний f_2 и f_3 больше частоты рабочего колебания f_p на 1 и 4 кГц соответственно. При температуре 30°C частота колебания f_1 практически не изменилась, частота рабочего колебания f_p незначительно изменилась (рис. 2), в то время как частоты колебаний f_2 и f_3 уменьшаются, приближаясь к рабочей частоте f_p .

При температуре 35°C частота колебания f_1 практически не меняется, частота колебания f_2 сближается с рабочей частотой f_p и АЧХ становится двухгорбой. При этой температуре при измерении ТЧХ в плавном интервале температур наблюдается первый незначительный перескок частоты ($\Delta f/f = -3,6 \cdot 10^{-6}$), показанный на ри-

сунке 2. Частота колебания f_3 также уменьшается, приближаясь к рабочей частоте f_p , и на резонансной характеристике появляется колебание f_4 .

На рис. 3 представлены АЧХ резонатора, измеренные на первой (а), третьей (б) и пятой (в) гармониках при фиксированных температурах. Для того, чтобы не загромождать рисунок, частоты f_1 показаны только на рисунке 3а, в нижней части каждой АЧХ указана температура их измерения.

Сопоставляя АЧХ резонатора на первой, третьей и пятой гармониках, измеренные при температуре 25°C видно, что на АЧХ первой гармоники помимо рабочего колебания с частотой f_p имеется еще три побочных f_1, f_2 и f_3 , в то время как на АЧХ третьей и пятой гармоники присутствует только по одному побочному колебанию.

Побочное колебание на АЧХ третьей гармоники ведет себя аналогично колебанию f_2 . При температуре +35°C АЧХ третьей гармоники также становится двухгорбой. В то же самое время побочное колебание на АЧХ пятой гармоники изменяется в меньшей степени. Таким образом, можно сделать вывод, что первый перескок частоты при температуре плюс 35°C вызван взаимодействием паразитных мод, расположенных вблизи первой и третьей гармоник (рис. 3, рис. 4).

Частота f_2 при дальнейшем повышении температуры, постепенно снижается, переходя на левый скат АЧХ, в то время как частота f_3 приближается к рабочей частоте f_p . При температуре плюс 45 °C появляется вторая двухгорбая характеристика и при этой температуре наблюдается второй небольшой перескок частоты при измерении ТЧХ ($\Delta f/f = -4,0 \cdot 10^{-6}$). Побочное колебание на АЧХ пятой гармоники при этой температуре приближается к рабочей

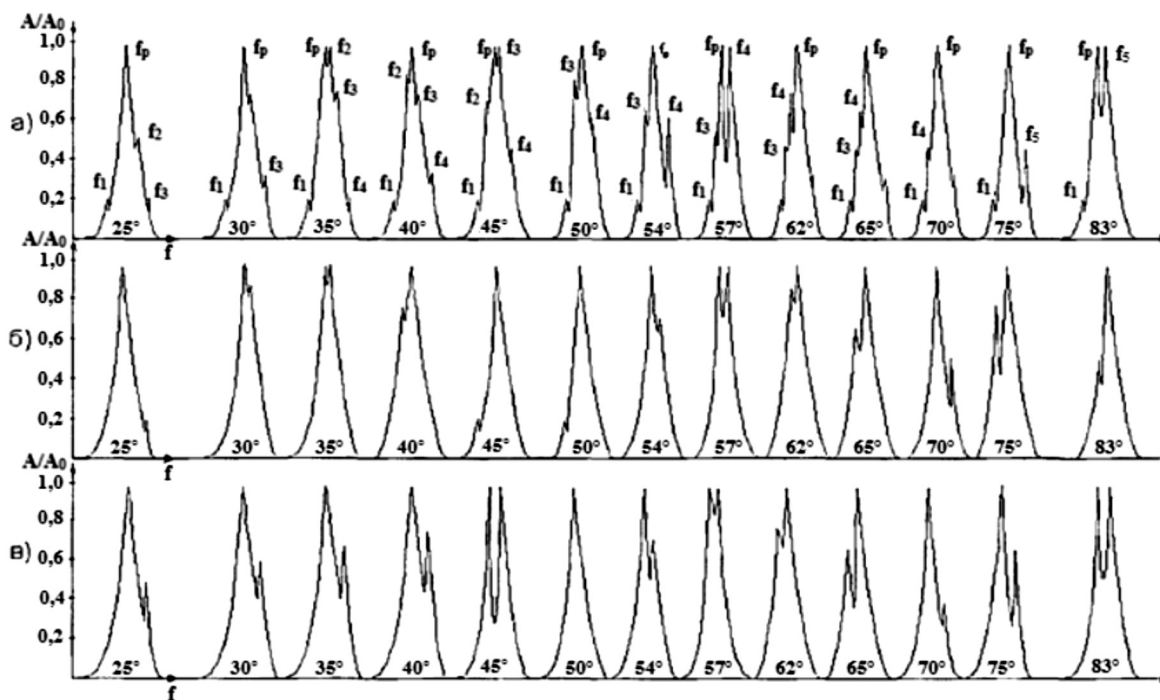


Рисунок 3. АЧХ резонатора, измеренные на первой (а), третьей (б) и пятой (в) гармониках при фиксированных температурах (25°C, 30°C, 35°C, ..., 83°C).

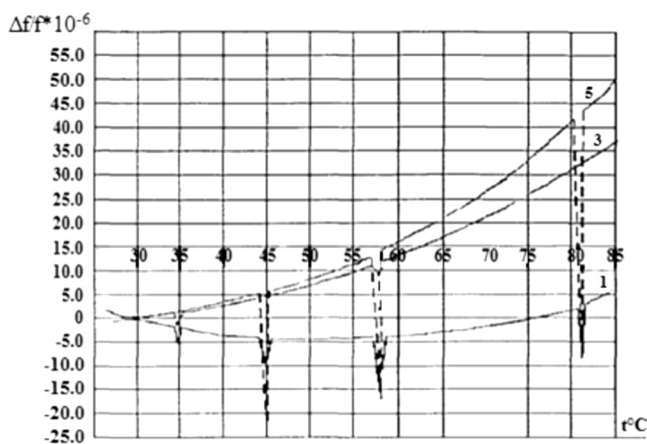


Рисунок 4. ТЧХ резонатора, измеренные на первой, третьей и пятой гармониках (кривые 1, 3, 5 соответственно).

частоте и амплитудно-частотная характеристика становится двухгорбой. Взаимодействие нежелательных мод, расположенных вблизи первой и пятой гармоник, изображенные на рис. 3 и 4 вызывает второй перескок частоты.

Частота колебания f_2 при дальнейшем повышении температуры постепенно уменьшается, становясь меньше колебания f_1 , и исчезает. Частота колебания f_3 при

температуре плюс 50 °C становится меньше рабочей частоты f_p , а частота колебания f_4 приближается к f_p . При температуре плюс 54°C амплитуда колебания f_4 резко увеличивается, а при температуре плюс 57°C АЧХ в третий раз становится двухгорбой, а искажение характеристики при этом максимально. При этой же температуре при измерении ТЧХ зафиксирован самый большой перескок частоты, равный $\Delta f/f = -15,9 \cdot 10^{-6}$ (рис. 3, рис. 4).

При этой температуре АЧХ третьей и пятой гармоник также становятся двухгорбыми. Третий перескок частоты является следствием взаимодействия побочной моды первой гармоники с побочными модами, расположенными вблизи третьей и пятой гармоник.

Частота колебания f_4 при повышении температуры до плюс 62°C становится меньше f_p и оно, постепенно снижаясь вместе с колебанием f_3 по левому скату АЧХ рабочей частоты, исчезает. Колебание f_5 появляется при температуре плюс 70°C, которое при плюс 75°C увеличивает амплитуду и начинает приближаться к рабочей частоте f_p . При этой же температуре появляется побочное колебание на АЧХ пятой гармоники. Четвертый перескок частоты происходит при температуре плюс 83°C и он равен $\Delta f/f = -9,7 \cdot 10^{-6}$ (рис. 3, рис. 4).

Таким образом, была зафиксировано целая серия побочных колебаний при повышении температуры от плюс

25°C до плюс 90°C, которые приводят к перескокам частоты в интервале рабочих температур, последовательно искажая АЧХ рабочего колебания f_p . Аналогичные изменения АЧХ зафиксированы на третьей и пятой гармониках, соответственно.

Проанализировав изменения АЧХ довольно большого количества резонаторов на первой, третьей и пятой гармониках можно сделать вывод, что изменения АЧХ на третьей гармонике довольно незначительны. Соответственно, наибольшие изменения АЧХ происходят на первой и пятой гармониках. Аналогично можно сделать вывод и о поведении ТЧХ резонаторов на гармониках.

Результаты проведенных исследований показали, что немоноктонность ТЧХ является результатом взаимодействия с рабочей частотой (основной гармоникой) колебаний, находящихся вблизи нее ($f_2, f_3, f_4...$), а также вблизи ее пятой и, значительно реже, третьей гармоники. При изменении температуры перемещаясь по АЧХ рабочего колебания, а также по АЧХ пятой или, значительно реже, третьей гармоники, эти колебания резко увеличивают свою амплитуду. "Двухгорбая" АЧХ рабочей частоты наблюдается при сближении этих частот и в этот момент происходит перескок частоты.

Экспериментально было установлено, что одним из способов уменьшения вероятности появления перескоков частоты можно достичь, применяя комплексные методы воздействия на амплитуду близлежащих к рабочей частоте изгибных колебаний, и на уменьшение нелинейной связи рабочей частоты с ее гармониками, снижая их добротность.

Одним из наиболее очевидных способов является уменьшение диаметра электрода. Это приводит к увеличению величины эквивалентного сопротивления резонатора на рабочей частоте и ее гармониках, что в свою очередь уменьшает нелинейную связь между ними. Одновременно с этим ухудшаются условия для возбуждения высокочастотных изгибных колебаний. Недостатком этого способа является уменьшение пределов перестройки частоты резонатора в схеме термокомпенсированного генератора.

Отказ от вакуумирования корпусов резонаторов является еще одним из вариантов уменьшения вероятности перескоков частоты. Это было подтверждено как прямыми экспериментами, так и массовыми испытаниями, сравнивающими резонаторы в вакуумированных корпусах и в корпусах, заполненных инертными газами. Известно, что вакуумирование корпуса приводит к увеличению добротности изгибных колебаний и колебаний сдвига по толщине. Одним из главных минусов этого способа

является ухудшение долговременной стабильности резонаторов, что влияет на их качество.

Возможным вариантом снижения добротности изгибных колебаний и колебаний сдвига по толщине является использование шлифованных пластин вместо полированных. В результате, что подтверждено сравнительными массовыми испытаниями резонаторов ухудшаются условия их взаимодействия, что приводит к уменьшению вероятности появления перескоков частоты. Недостаток этого способа такой же, как и у предыдущего.

Ухудшение качества кварца, а в частности, уменьшение его добротности, приводит к уменьшению вероятности появления перескоков частоты. Это вероятно связано с тем, что на гармониках колебаний доля внутренних потерь в общих потерях акустической энергии колебаний резко возрастает. Это приводит к уменьшению нелинейной связи рабочего колебания с его гармониками, особенно, с пятой гармоникой. Однако, использование низкодобротного кварца весьма проблематично.

Таким образом, с учетом данных приведенных в работе [5], можно утверждать, что вероятность появления перескоков частоты зависит от:

- ◆ качества обработки поверхности пластины;
- ◆ материала, формы и размеров электрода;
- ◆ способа монтажа;
- ◆ формы и размеров пьезоэлемента;
- ◆ метода очистки пьезоэлемента;
- ◆ качества пьезокварца;
- ◆ номера гармоники;
- ◆ вакуумирования корпуса резонатора;
- ◆ скорости изменения температуры;
- ◆ уровня возбуждения резонатора в схеме генератора.

При этом следует однако учитывать, что большинство способов, уменьшающих перескоки частоты, приводят к некоторому ухудшению других параметров резонатора. Например, для того, чтобы обеспечить высокие требования к долговременной стабильности резонаторов в технологический процесс вводится полировка пластин, хотя следствием этого является увеличение вероятности появления резонаторов с немоноктонными ТЧХ. Поэтому в каждом конкретном случае нужно находить компромиссное решение, допускающее наличие небольшого количества брака при изготовлении резонаторов.

Результаты проведенных исследований показали, что немоноктонность ТЧХ является результатом взаимодействия изгибных колебаний с рабочей частотой (основной гармоникой), находящихся вблизи нее. При сближении этих частот наблюдается "двухгорбая" АЧХ рабочей частоты и в этот момент происходит перескок частоты. Учи-

тая, что в этот же момент происходят аналогичные явления вблизи гармонических колебаний рабочей частоты, можно утверждать, что между ними существует нелинейная связь.

Вероятность появления узкотемпературных перескоков частоты (немонотонности ТЧХ) зависит от технологии

изготовления резонаторов и особенностей конструкции.

Большинство предложенных способов, уменьшающих вероятность появления перескоков частоты, приводят к некоторому ухудшению параметров резонаторов. Вследствие этого, в каждом конкретном случае следует находить компромиссное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вуд А. и др. Провалы активности в кристаллах АТ-среза // Материалы 21 симпозиума по стабилизации частоты. – Вып. 55. – Колорадо, 1967. – С. 254–260.
2. Ливенский Г.А., Пашков С.С. Технический отчет по теме "Исследования и разработка высокостабильных высокочастотных резонаторов" // НИИ Пьезотехники. – М., 1965. – 37 с.
3. Симонов В.Н. Провалы активности в высокочастотных гармониковых кварцевых резонаторах // Электронная техника. – Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – Вып. 4 (45). – 1981. – С. 46–49.
4. Франк С. Провалы активности в кварцевых пластинах АТ-среза при высоких уровнях возбуждения // Материалы 21 симпозиума по стабилизации частоты. – Вып. 55. – Колорадо, 1967. – С. 153–159.
5. Frerking M.E., Paisley B.W., Thomas W.C. Micro-frequency jump design of experiments investigation // the 52nd Frequency Control Symposium Proceedings. – Washington, D.C., 1998. – P. 116–120.
6. Godwin P.F. Jr, Snider G.L. Methods for production screening for anomalous responses in quartz crystals intended for high reliability application // the 31st Frequency Control Symposium Proceedings. – Vol. 67. – Denver, 1977. P. 7895.

© К.Е. Матвеев, (predcir2009@yandex.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики».

6-я специализированная выставка

ГЕО-КАЗАНЬ:

Геологоразведка. Геодезия. Картография.

В РАМКАХ ТАТАРСТАНСКОГО
НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО
ФОРУМА

**Форум проводится при поддержке:
Президента Республики Татарстан
Правительства Республики Татарстан**

ГЕО-КАЗАНЬ

ТНФ

12+
РЕКЛАМА

Организатор: ОАО «Казанская ярмарка»
Россия, 420059, Казань, Оренбургский тракт, 8
т./ф.: (843) 570-51-14, 570-51-17,
570-51-11 (круглосуточный)
e-mail: d2@expokazan.ru, expokazan02@mail.ru
www.geoexpokazan.ru, www.expokazan.ru

ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ISO - 9001

КАЗАНСКАЯ
ЯРМАРКА