

# КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ – ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В.Кочемасов, к.т.н., Е.Хасьянова alena@radiocomp.ru

Кварцевые резонаторы – это высокочастотные пьезоэлектрические элементы, которые применяются для стабилизации частоты колебаний. Они широко используются в системах связи, измерительной и бытовой аппаратуре, вычислительной технике, высокочувствительных датчиках и др. Различные типы резонаторов имеют свои достоинства и недостатки, в конечном итоге оказывающие влияние на характеристики автогенераторов. Об особенностях и областях применения кварцевых резонаторов рассказывается в этой статье.

**В**следствие высокой цены природного кварца и ограниченных его запасов, в электронике используют синтетические кристаллы кварца, получаемые методом гидротермального синтеза, при температуре 350°C под давлением около двух тысяч атмосфер. Выращивание кристаллов занимает от 30 до 260 дней. По мере увеличения срока получения кварца повышаются его однородность и чистота, что приводит к сближению качественных показателей синтетического и природного кварца [1]. Большое внимание уделяется также завершающей обработке полученных пластин, поскольку любые шероховатости приводят к ухудшению электрических характеристик и увеличению уровня фликкер-шумов.

Основные характеристики, по которым оценивается качество резонаторов, – добротность, частотный и рабочий температурный диапазоны, начальная точность калибровки, показатели стабильности частоты: частотно-температурная стабильность и старение.

Поскольку кварц анизотропен, механические, электрические и температурные свойства вырезанной из него пластины зависят от угла ее наклона в кристалле (рис.1). Ориентация пластины кварца относительно кристаллографических осей более всего влияет на частотно-температурную характеристику,

определяемую как максимально возможный уровень отклонения частоты резонатора от номинального значения в заданном температурном диапазоне, в интервале от нескольких минут до нескольких часов. Эта характеристика зависит от точности, с которой пластину вырезают из кристалла, и оказывает наибольшее влияние на стоимость автогенератора.

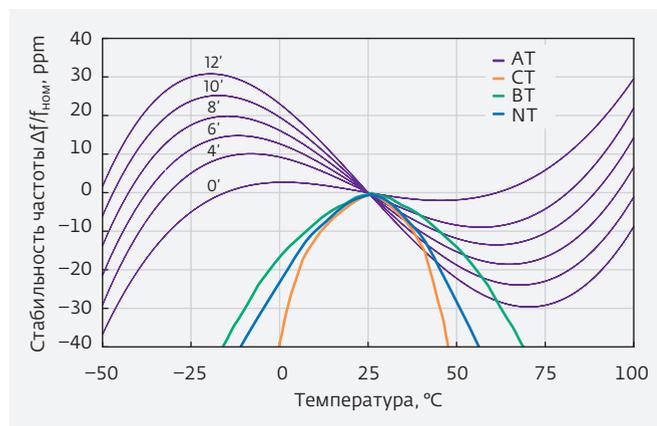
Важный параметр кварца – температура Кюри (573°C), при превышении которой он теряет большую часть пьезоэлектрических свойств и переходит в форму, получившую название бета-кварц.

Стабильность частоты кварца зависит не только от температуры, но и от внутренних изменений в кристалле с течением времени, то есть старения. На его значение оказывают влияние многие факторы, связанные с производством и эксплуатацией. Производители, как правило, указывают максимальный уровень старения в первый и последующие годы.

На процесс старения кварца влияет и радиация. Для увеличения радиационной стойкости существует специальная технология очистки (sweeping) кристалла кварца. Для этого кварц помещают в термостат с температурой в 500°C и медленно пропускают через электромагнитное поле. Это позволяет собрать все щелочные металлы, ухудшающие радиационную стойкость, в одном месте и отрезать эту часть кристалла [2].

В электронике для мегагерцового диапазона чаще всего применяются кристаллы с типом среза АТ. Для таких кварцевых пластин характерна кубическая зависимость частоты от температуры, с точкой перегиба ( $T_i$ ) от 25 до 30°C, зависящей от особенностей производства. Подобная частотно-температурная характеристика позволяет обеспечить стабильные свойства для автогенераторов в более широком диапазоне температур, по сравнению со срезами ВТ, СТ, NT, имеющими параболическую зависимость (рис.2) [3].

Недостатки АТ-резонаторов – их хрупкость, длительное время вхождения в рабочий режим, наличие провалов на частотно-температурной кривой (рис.3) [2],

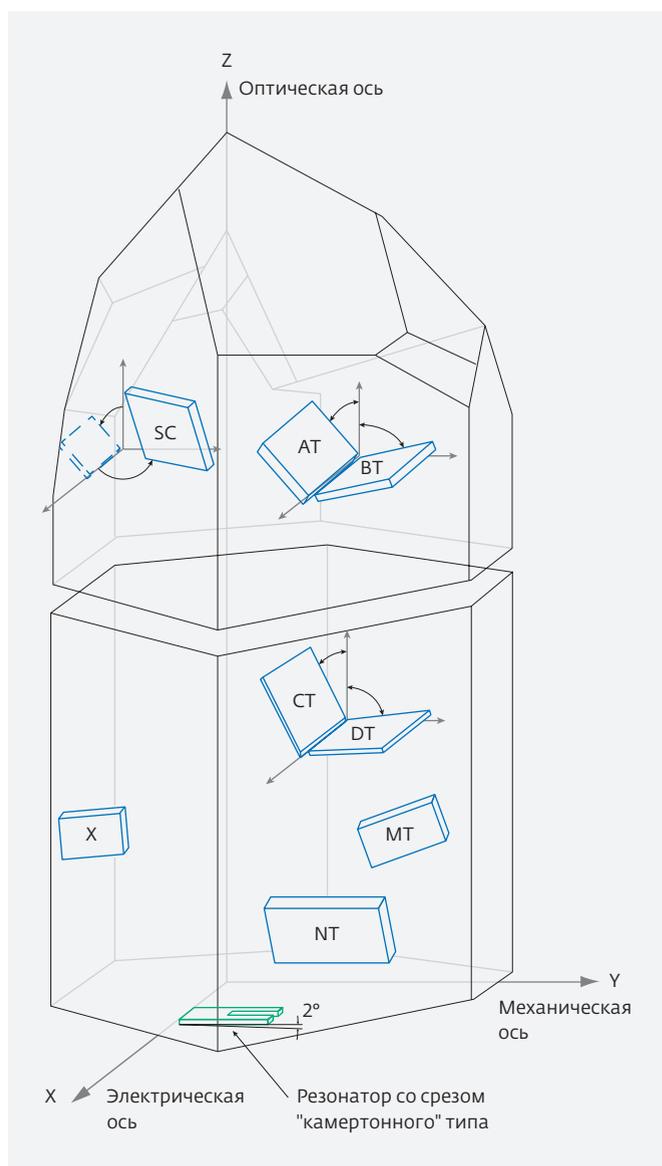


**Рис.2.** Зависимость стабильности частоты кварцевых резонаторов от температуры. 0'-12' – отклонение угла выреза пластины с АТ-срезом относительно стандартного значения 35°25'.  $f_{ном}$  – номинальная частота

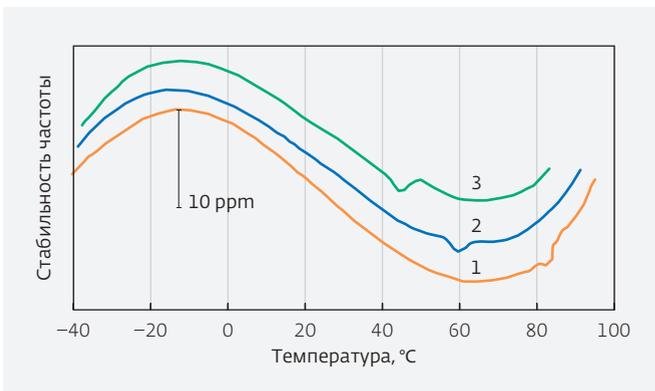
вызванных резким изменением сопротивления резонатора при определенных температурах.

Для работы в высокотемпературных условиях применяются кварцевые пластины "с двойным вращением" (double rotated), то есть вырезанные из кристалла под углом к оптической и электрической осям. К ним относятся пластины со срезами типа FC, IT и SC. Они отличаются более высокой добротностью (около миллиона) и имеют более высокую температуру точки перегиба  $T_i$  (рис.4) [4]: для кварцев с FC-срезом  $T_i=45-55^\circ\text{C}$ , для пластин с IT-срезом  $T_i=70-80^\circ\text{C}$ , а для кварцевых пластин SC-среза  $T_i=85-95^\circ\text{C}$ .

Кроме того, резонаторам из кварца с двойным вращением свойственны более медленное старение, меньшая чувствительность к механическим воздействиям и большая виброустойчивость. Стоит отметить, что характеристика старения для кристаллов с двойным вращением будет соответствовать указанной производителем только после 30 дней с момента начала работы автогенератора.



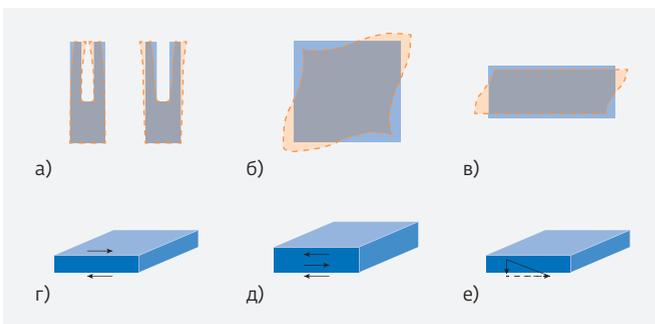
**Рис.1.** Ориентация пластин различных типов среза относительно кристаллографических осей кристалла кварца



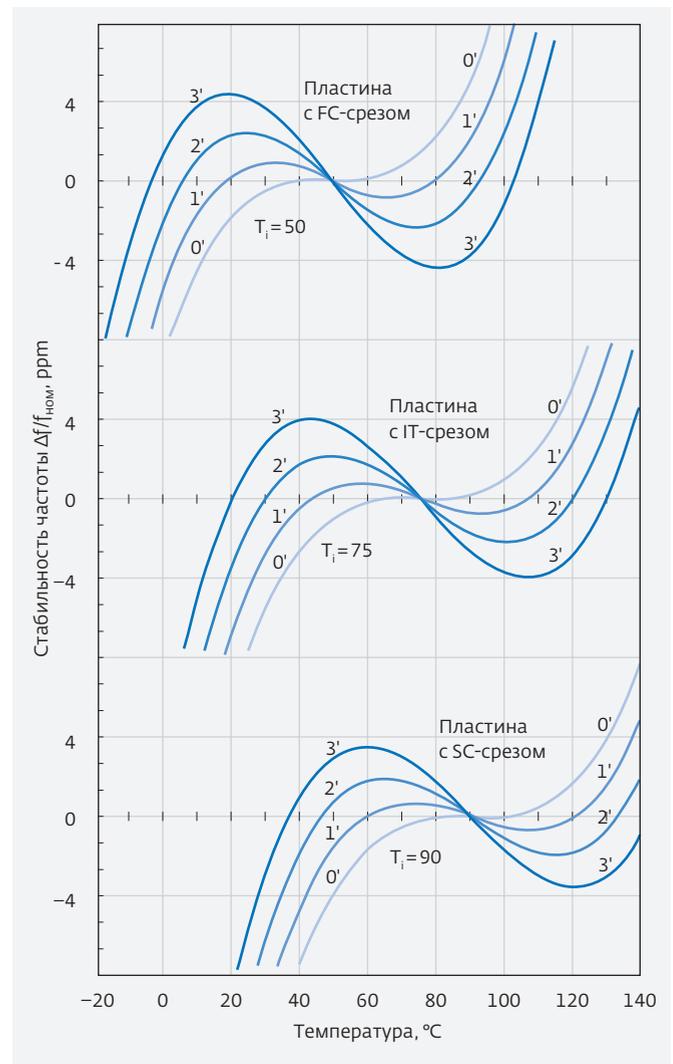
**Рис.3.** Провалы на частотно-температурной характеристике, возникающие из-за внезапного изменения сопротивления. Кривая 1 построена для резонатора без нагрузочного конденсатора. Кривые 2, 3 отображают зависимость частоты от температуры при разных значениях емкости нагрузочного конденсатора

При температурах ниже 60–70°C частотно-температурная стабильность резонаторов с SC-срезом резко ухудшается. Поэтому они применяются в термостатированных автогенераторах с рабочими температурами кварца 60–110°C [3]. Платой за лучшие значения параметров температурной стабильности, старения, меньший уровень фазового шума является более высокая цена, обусловленная необходимостью дополнительной коррекции угла среза и помещения кварца в вакуумный металлический корпус.

В килогерцовом диапазоне частот применяют так называемые камертонные резонаторы. Своё название они получили из-за внешнего вида (см. рис.1). Возможный диапазон частот для таких резонаторов составляет 30–500 кГц. Наиболее распространённая номинальная частота резонаторов этого типа – 32,768 кГц. Такие



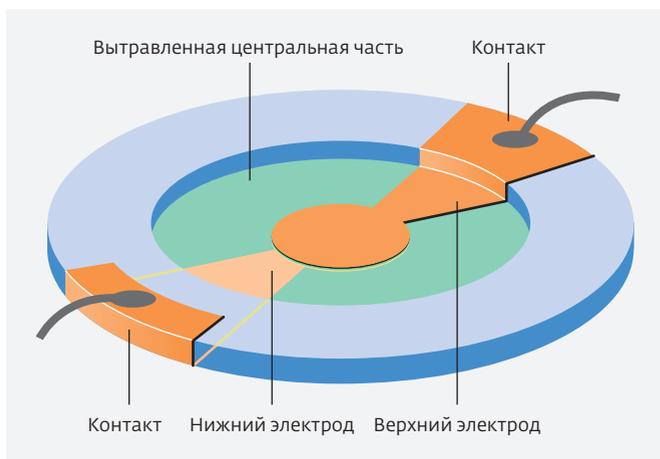
**Рис.5.** Виды механических колебаний, наблюдаемых в кварцевых резонаторах в зависимости от типа среза: а) в часовых резонаторах; б) в низкочастотных СТ, DT, SL-резонаторах; в), г), д) в кристаллах с АТ- и ВТ-срезами; е) в SC-резонаторах



**Рис.4.** Зависимости стабильности частоты кварцевых резонаторов от температуры для пластин с двойным вращением. 0'–3' – точность вырезания пластины из кристалла относительно стандартного значения.  $f_{ном}$  – номинальная частота

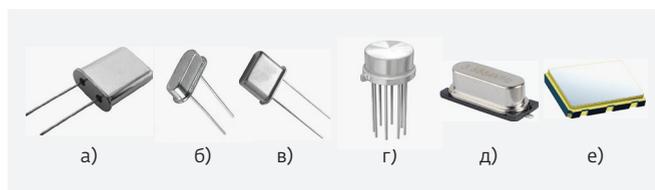
резонаторы применяются в часовой промышленности. Автогенераторы на основе этих резонаторов потребляют весьма малую мощность, что делает их незаменимыми в устройствах с батарейным питанием.

Схема замещения кварцевой пластины представляет собой колебательный контур [1, 2, 5]. Механические режимы колебаний зависят от типа среза кварцевого резонатора (рис.5). Эти колебания могут происходить на частотах как первой, так и третьей, пятой, седьмой, а иногда и девятой гармоник. Так, например, для кварцевых резонаторов с АТ-срезом колебания на основной частоте происходят до 30–40 МГц, на третьей гармонике – до 60–65 МГц, на пятой – до 125 МГц, на седьмой – до 256 МГц.



**Рис.6.** Кварцевый резонатор с применением технологии "инвертированный меза-кристалл"

Кварцевые пластины, работающие на гармониках, имеют более высокую добротность, низкие уровни джиттера и фазового шума. Недостатки таких режимов – более высокий уровень негармонических искажений, для снижения которого изменяют форму и размеры напыляемых электродов. Кроме того, для кварца с АТ-срезом колебания на частоте первой (75–350 МГц) или более высоких (150–800 МГц) гармоник можно получить [2], используя технологию "инвертированных меза-кристаллов" (рис.6). Эта технология основана на зависимости частоты колебаний от толщины резонатора и заключается в вырезании из пластины кварца центральной области определенного размера. Такие резонаторы применяют для высокочастотных тактовых

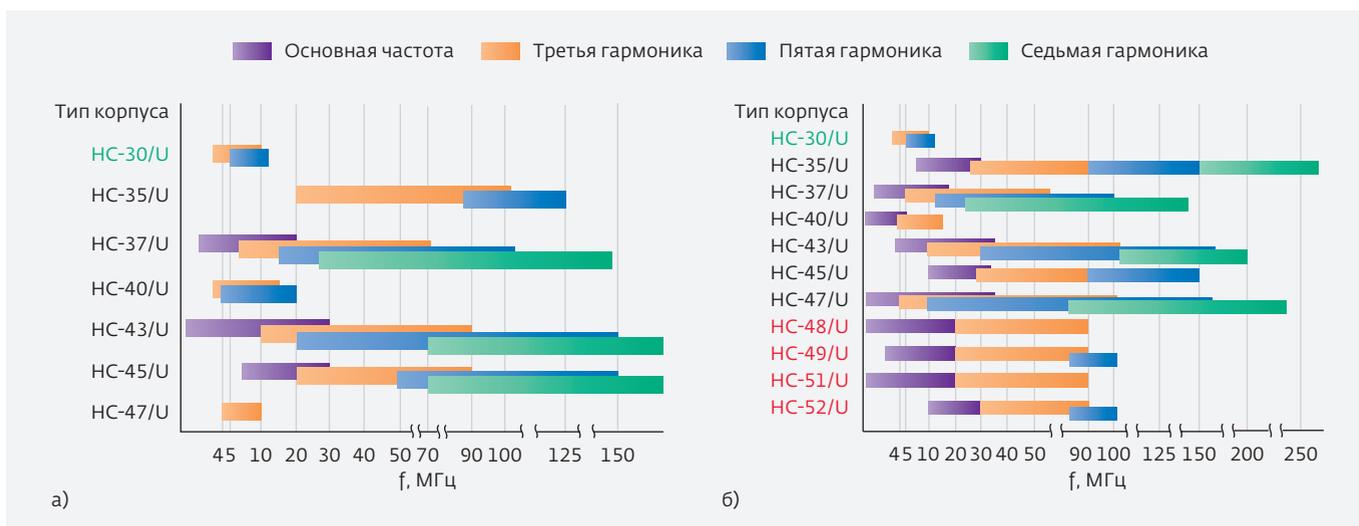


**Рис.7.** Корпуса, применяемые для резонаторов: а) НС-43/У, -49/У; б) НС-37/С, -49/С; в) УМ-1, -4, -5; г) НС-37/У или НС-35/У; д) НС-49/С; е) керамический SMD

генераторов. Недостатки данной технологии – более высокий показатель старения  $\pm(2-3 \text{ ppm})$  и увеличение стоимости кварцевого резонатора. Последнее обусловлено сложностью вытравливания центральной области и необходимостью использования предварительно очищенного кварца.

Компаниями-производителями (см. таблицу) [6–31] предлагаются кварцевые резонаторы с различными типами срезов в металлических или керамических корпусах нескольких видов (рис.7), толщиной от 13 до 0,7 мм для частотного диапазона 1,84–350 МГц. Рабочий частотный диапазон кварцевого резонатора зависит не только от особенностей его производства, но и от типа корпусирования (рис.8).

В корпусах типа НС-49/У (рис.9а) или НС-35/У (рис.9б) выводы кварцедержателей изолируются от металлического основания стеклянными уплотнителями. При сгибании или укорочении выводов уплотнители вследствие их хрупкости могут сломаться, что нарушит герметичность кварцедержателя. В процессе эксплуатации такие нарушения условий вакуумирования



**Рис.8.** Возможные частотные диапазоны резонаторов с различным типом корпусирования для пластин с двойным вращением (а) и АТ-срезом (б). Названия корпусов выделены разными цветами: зеленым – стеклянные корпуса; красным – металлические корпуса с контактной сваркой; черным – корпуса с холодной сваркой

## Характеристики кварцевых резонаторов

Производитель	Модель	Тип корпуса	$f_{\text{мин}}-f_{\text{макс}}$ , МГц	Точность настройки при $T=25^{\circ}\text{C}$ , ppm	$\Delta f/f_{\text{ном}}$ , ppm	$T_{\text{мин}}-T_{\text{макс}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{дин}}$ , Ом	Тип среза
Bliley	TO style	HC-37/U	1,0-150	$\pm 50$	$\pm 50$	-55...105	$\leq 250$	АТ
Raltron	UM-4	HC-49/U	1,0-360	$\pm 5... \pm 25$	$\pm 3... \pm 50$	-10...60	$\leq 350$	АТ
Vectron	VXA1	HC-49/U	1,84-150	$\pm 10... \pm 25$	$\pm 30... \pm 100$	-40...85	-	АТ
IQD	HC49	HC-49/U	1,84-270	$\pm 5... \pm 100$	$\pm 5... \pm 100$	-40...85	$\leq 800$	АТ
International crystal manufacturing	HC37/U	HC-37/U	2,5-105,0	$\pm 5, \pm 20$	$\pm 5, \pm 20$	-55...125	$\leq 60$	АТ, ВТ, ИТ, SC
ТХС	9В	HC-49/S	3,2-90	$\pm 30$	$\pm 30$	-20...70	$\leq 200$	АТ
Rakon	RHS-49US	HC-49/S	3,4875-75	$\pm 5... \pm 50$	$\pm 3... \pm 50$	-40...85	$\leq 150$	АТ, ВТ
Морион	PK386	HC-49/S	3,5-100	$\pm 15... \pm 50$	$\pm 1,5... \pm 50$	-60...85	$\leq 150$	АТ
Colledge	UM-1J	UM-1J	3,579-300	$\pm 5... \pm 100$	$\pm 5... \pm 100$	-40...85	$\leq 200$	АТ
Fox electronics	HC80U	HC-49/U	3,579-200	$\pm 30$	$\pm 50$	-20...70	-	АТ
Ecliptek	E1S	HC-49/S	3,58-50	$\pm 10... \pm 50$	$\pm 15... \pm 100$	-40...85	$\leq 200$	АТ, ВТ
Taitien	XJ	HC-49/S	4-48	$\pm 5... \pm 30$	$\pm 5... \pm 20$	-40...85	$\leq 140$	АТ
Seiko Epson	CA-301	T38W	4-64	$\pm 30$	$\pm 30, \pm 50$	-20...70	$\leq 200$	АТ
Лит Фонон	PK22M	МД	4-100	$\pm 5, \pm 10$	$\pm 5... \pm 30$	-60...85	$\leq 60$	АТ
Pericom (SaRonix)	F6/FX	Керамич. SMD	6-125	$\pm 10... \pm 30$	$\pm 10... \pm 50$	-40...85	$\leq 80$	АТ
EuroQuartz	MQ	Керамич. SMD	6,0-125	$\pm 10... \pm 30$	$\pm 5... \pm 20$	-20...70	$\leq 100$	АТ
Abrakon	ABU	UM-1	6,0-200,0	$\pm 10... \pm 50$	$\pm 3... \pm 50$	-40...85	$\leq 140$	АТ
River	FCX-03	Керамич. SMD	8,0-60	$\pm 15... \pm 100$	$\pm 10... \pm 100$	-40...85	$\leq 500$	АТ
Connor Winfield	XL-1	Керамич. SMD	8,0-100,0	$\pm 50$	$\pm 50$	-10...60	$\leq 80$	АТ, SC
Geyer quartz tech	KX-12A	Керамич. SMD	8,0-150,0	$\pm 10... \pm 50$	$\pm 30... \pm 120$	-40...105	$\leq 100$	АТ
PDI	TC-series	HC-37/U	8,0-200,0	$\pm 10... \pm 50$	$\pm 25... \pm 100$	-40...85	$\leq 60$	АТ, SC, ИТ, FC
Метеор-КУРС	PK524	Керамич. SMD	8,0-200,0	$\pm 5... \pm 30$	$\pm 20... \pm 40$	-60...85	$\leq 100$	АТ
Кюсера	CX-96F	Керамич. SMD	9,8-80	$\pm 10$	$\pm 15$	-30...85	$\leq 150$	АТ
ОАО Пьезо	PK1001	Керамич. SMD	10-120	$\pm 10... \pm 20$	$\pm 5... \pm 40$	-20...70	70	АТ

Производитель	Модель	Тип корпуса	$f_{\text{мин}}-f_{\text{макс}}$ , МГц	Точность настройки при $T=25^{\circ}\text{C}$ , ppm	$\Delta f/f_{\text{ном}}$ , ** ppm	$T_{\text{мин}}-T_{\text{макс}}$ , *** °C	$R_{\text{дин}}$ , **** Ом	Тип среза
KVG	XMP-4100	UM-5	10-160	$\pm 25... \pm 100$	$\pm 25... \pm 100$	-40...85	$\leq 120$	АТ
Пьезотрон	PK422	UM-1, UM-5	10-256	$\pm 1... \pm 100$	$\pm 3... \pm 100$	-60...85	$\leq 200$	АТ
NDK	NX3225SA	Керамич. SMD	12-150	$\pm 15, \pm 20$	$\pm 25$	-40...85	$\leq 140$	АТ
ОАО Пьеzo	PK460	UM-1	100,6	$\pm 5$	$\pm 10$	47,5-107,5	$\leq 120$	SC
Vectron	XR-R	HC-35/U	7-225	$\pm 2... \pm 10$	$\pm 5... \pm 50$	-55...125	-	АТ, SC, IT
EuroQuartz	HC35	HC-35/U	8-250	$\pm 3... \pm 50$	$\pm 3... \pm 50$	-55...125	$\leq 120$	АТ
Micro crystal Switzerland	CC6F	Керамич. SMD	70-200	$\pm 20$	$\pm 20$	-40...85	-	АТ

\* диапазон возможных значений номинальной частоты;

\*\* стабильность номинальной частоты ( $f_{\text{ном}}$ );

\*\*\* диапазон рабочих температур;

\*\*\*\* динамическое сопротивление.

ухудшают показатели стабильности частоты. Для устранения этого недостатка по возможности используется SMD-корпусирование (рис.9в). Целостность стеклянных уплотнителей в этом случае тестируется производителем.

В качестве базового напыления электродов используют золото или серебро. Для окончательной корректировки частоты часть напыления при необходимости удаляется. Золото из-за более высокой стоимости применяется для высокочастотных прецизионных кварцевых резонаторов.

Для прецизионных высокочастотных кварцевых резонаторов используют более сложные системы их

крепления. Так, компания Vectron International разработала конструкцию крепления пьезопластины на четырех разгружающих опорах (Quad Relief Mount, QRM) (рис.10) [7]. Основные преимущества данной конструкции – увеличение долговременной стабильности частоты и виброустойчивости. Испытания резонаторов с данной конструкцией кристаллодержателя показали их низкую чувствительность к вибрациям вплоть до величин 10 g.

Свойства кварцевых резонаторов в конечном итоге определяют такие важные характеристики автогенераторов, как стабильность частоты, рабочий температурный диапазон, возможность перестройки частоты и др. Многообразие срезов кварцев позволяет

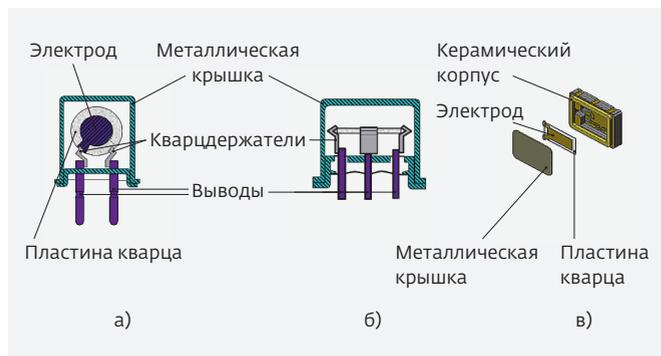


Рис.9. Типы корпусирования кварцевых резонаторов: двухпиновый (а) и трех- или четырехпиновый (б) металлические корпуса; керамический корпус для поверхностного монтажа (в)

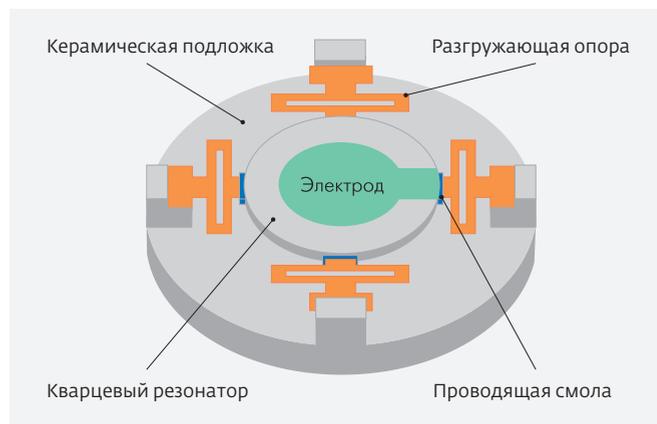


Рис.10. Конструкция крепления пьезопластины при использовании разгружающих опор

подобрать нужный вариант в зависимости от области применения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [www.jauch.de/ablage/med\\_00000818\\_1327049076\\_Quartz%20Crystal%20Theory%202007.pdf](http://www.jauch.de/ablage/med_00000818_1327049076_Quartz%20Crystal%20Theory%202007.pdf)
2. **Cerda R.M.** Understanding Quartz Crystals and oscillators. – Artech House. – 2014, 299 p.
3. [txccrystal.com/term.html](http://txccrystal.com/term.html)
4. [www.crovencrystals.com](http://www.crovencrystals.com)
5. Радиопередающие устройства / Под ред. Шахгильдяна В.В. – М.: Радио и Связь, 2003. – 560 с.
6. [www.raltron.com](http://www.raltron.com)
7. [www.vectron.com](http://www.vectron.com)
8. [www.sjk-crystal.com](http://www.sjk-crystal.com)
9. [www.kds.info/index\\_en.htm](http://www.kds.info/index_en.htm)
10. [www.txccrystal.com](http://www.txccrystal.com)
11. [www.rakon.com](http://www.rakon.com)
12. [www.morion.com.ru/rus](http://www.morion.com.ru/rus)
13. [www.ecliptek.com](http://www.ecliptek.com)
14. [www.taitien.com.tw/en](http://www.taitien.com.tw/en)
15. [www5.epsondevice.com/en/products](http://www5.epsondevice.com/en/products)
16. [www.lit-phonon.ru](http://www.lit-phonon.ru)
17. [www.pericom.com](http://www.pericom.com)
18. [www.euroquartz.co.uk](http://www.euroquartz.co.uk)
19. [www.river-ele.co.jp/products\\_en/p-at.html](http://www.river-ele.co.jp/products_en/p-at.html)
20. [www.kyocera-crystal.jp/eng/about-us/business-development/xtal1](http://www.kyocera-crystal.jp/eng/about-us/business-development/xtal1)
21. [www.oaopiezo.com](http://www.oaopiezo.com)
22. [www.kvg-gmbh.de](http://www.kvg-gmbh.de)
23. [www.piezotron.ru](http://www.piezotron.ru)
24. **Jones T. B. et al.** Electromechanics and MEMS, New York: Cambridge University Press, 2013.
25. [www.wi2wi.com/products/product-types/crystals](http://www.wi2wi.com/products/product-types/crystals)
26. [www.golledge.com](http://www.golledge.com)
27. [www.geyer-electronic.com/Quartz-Crystals](http://www.geyer-electronic.com/Quartz-Crystals)
28. [www.microcrystal.com/index.php](http://www.microcrystal.com/index.php)
29. [www.foxonline.com](http://www.foxonline.com)
30. [www.icmfg.com](http://www.icmfg.com)
31. [www.iqdfrequencyproducts.com](http://www.iqdfrequencyproducts.com)

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



# КОМПЬЮТЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД

ИЗДАНИЕ 5-е

Хеннесси Джон Л., Паттерсон Дэвид А.

Перевод с англ. под ред. к.т.н. А.К.Кима

При поддержке ПАО "ИНЭУМ" им. И.С.Брука

М: ТЕХНОСФЕРА,  
2016. – 936 с.  
ISBN:  
978-5-94836-413-1

Цена 1600 руб.

Компьютерный мир сегодня находится в центре революции: мобильные клиенты и облачные вычисления являются сейчас доминирующей парадигмой в развитии программирования и аппаратных инноваций. Пятое оригинальное издание «Компьютерной архитектуры» фокусируется на этом существенном сдвиге. Ключевым моментом нового издания является значительно переработанная глава, посвященная параллелизму уровня данных, которая раскрывает тайну архитектур графических процессоров с помощью четких объяснений, используя традиционную терминологию архитектуры ЭВМ.

В книге описывается, каким образом программное обеспечение и облачные технологии стали доступны для сотовых телефонов, планшетных компьютеров, ноутбуков и других мобильных устройств. Каждая глава включает в себя два реальных примера (один мобильный центр и один центр обработки данных), чтобы проиллюстрировать эти революционные изменения.

Книга предназначена как для профессиональных инженеров и архитекторов, так и для тех, кто связан с преподаванием и изучением курсов современной архитектуры и проектирования компьютеров.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru), [sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)