

# Проблемы микроминиатюризации корпусов кварцевых резонаторов

Олег ИВАНОВ  
oyi@efo.ru  
Елена ЛАМБЕРТ  
elena@efo.ru

**Тенденции микроминиатюризации электронной техники требуют выпуска кварцевых резонаторов во все более компактных корпусах. При этом необходимо обеспечить высокую надежность и эксплуатационные характеристики, в частности, широкий температурный диапазон и малый уход частоты. В статье на примере кварцевых резонаторов, выпускаемых компанией Golledge, рассматриваются проблемы, вызванные уменьшением размера корпуса кварцевого резонатора.**

Рассмотрим тенденции микроминиатюризации корпусов. Продукция компании Golledge хорошо известна разработчикам электронной аппаратуры в нашей стране своими высоконадежными кварцевыми резонаторами и приборами на их основе. Зачастую продукты компании выбирают для применения в аппаратуре благодаря возможности заказа небольших серий с заданными параметрами.

В последнее время для изготовления кварцевых резонаторов практически все производители используют искусственно выращенные кристаллы кварца. И, как правило, применяют так называемый АТ-срез, который определяется ориентацией среза относительно кристаллографических осей. Этот срез весьма популярен, поскольку обеспечивает широкий диапазон частот, высокую температурную стабильность и, что немало важно, высокую повторяемость параметров, получаемых от кристалла (технологичность для производства). Поэтому рассмотрим, на какие параметры влияет уменьшение размеров резонатора и какие меры необходимо предусмотреть для обеспечения его надежной работы.

В таблице 1 наглядно показана тенденция уменьшения габаритов популярных корпусов кварцевых резонаторов компании Golledge и постепенный переход к компакт-

ным корпусам в SMD-исполнении (для поверхностного монтажа).

Кроме резонаторов с АТ-срезом, популярность получили и низкочастотные камертонные резонаторы, которые обычно используются в схемах формирования сигналов реального времени на частоту 32768 Гц и аналогичные частоты (генераторы секундных импульсов, календари и т. д.). Для таких резонаторов тоже наблюдается тенденция уменьшения размеров и переход к SMD-исполнению (табл. 2).

Для понимания проблем, вызываемых уменьшением габаритов корпуса, обратимся к упрощенной эквивалентной схеме замещения кварцевого резонатора.

## Электрическая модель кварцевого резонатора

На рис. 1 приведена электрическая модель кварцевого резонатора Golledge типа GSX-333 с реальными параметрами на частоту 24 МГц. Эта модель упрощена, поскольку не учитывает механизмы возникновения гармоник и паразитных резонансов, а также нелинейные процессы, происходящие в кристалле. Необходимо отметить, что имеющиеся в схеме замещения динамическое сопротивление  $R_1$ , которое иногда в англоязычной литературе обозначают как  $RR$ , отличается

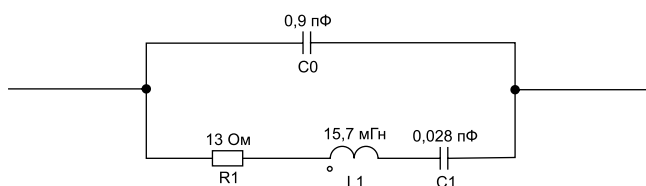


Рис. 1. Электрическая модель резонатора GSX-333 24 МГц. Фактические параметры по материалам компании Golledge

Таблица 1. Тенденция уменьшения размера корпусов кварцев с АТ-срезом, выпускаемых Golledge

Корпус	Размер, мм	Год выпуска	Внешний вид
HC49	11,05×4,65×13,46	Начало 1980-х	
UM1	7,8×3,2×8	Середина 1980-х	
GSX49-4	12,9×4,8×4,3	1993	
GSX-751	7,2×5,2×1,3	2000	
GSX-532	5,2×3,4×1,3	2001	
GSX-433	4,1×2,6×0,8	2003	
GSX-333	3,3×2,6×0,7	2004	
GSX-323	2,6×2,1×0,6	2005	
GSX-221	2,1×1,7×0,6	2008	
GSX-213	1,65×1,25×0,35	2012	

Таблица 2. Тенденция уменьшения размера корпусов резонаторов камертонного типа, применяемых для низких частот

Корпус	Размер, мм	Год выпуска	Внешний вид
GWX-26	2,1×6,2		
CM8V	2×1,2×0,6	2010	
	1,6×1×0,38	В разработке	

по физической сущности от ESR (эффективное последовательное сопротивление). Динамическое сопротивление  $R1$  и эффективное последовательное сопротивление ESR связаны следующим отношением:

$$ESR = R1 \times (1 + C0/C1)^2,$$

где  $C0$  — собственная емкость кристалла (кристаллодержателя и обкладки резонатора),  $C1$  — емкость нагрузки в параллельном режиме резонанса.

В соответствии с этой моделью рассмотрим, к изменению каких параметров приводит уменьшение габаритов кварцевого резонатора. Соответственно, изменения будем рассматривать на основе анализа зависимостей для упрощенной модели, делая выводы в отношении качественных, а не количественных изменений.

### Изменение характеристик при уменьшении размеров корпуса

#### Снижение $C0$ (часто используют термин «статическая емкость» или «параллельная емкость резонатора»)

Частота колебаний кварца со срезом типа АТ в основном определяется толщиной пластины (для частоты 26 МГц при использовании АТ-среза для работы на основной гармонике толщина кристалла составляет 64 мкм и частота резонанса практически не зависит от линейных размеров). Поэтому размеры кристалла могут быть уменьшены так, чтобы поместиться в корпус, но это приводит к сокращению площади электродов, выполненных в виде слоя металлизации, нанесенного на пластину (рис. 2). Очевидно, что емкость  $C0$  пропорциональна площади электродов и примерно может быть определена по следующей формуле (данное соотношение не учитывает краевой эффект и паразитную емкость корпуса и выводов):

$$C0 = A \times Ff \times 0,026,$$

где  $C0$  — емкость, пФ;  $A$  — площадь электродов, мм<sup>2</sup>;  $Ff$  — частота основной гармоники, МГц.

Соответственно, при сокращении площади электродов  $C0$  уменьшается.

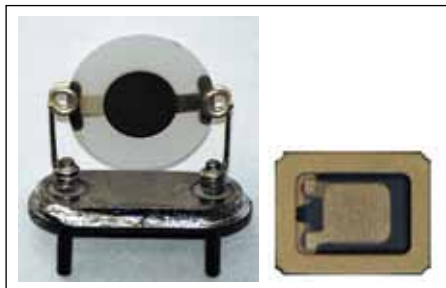


Рис. 2. Сравнение конструкции резонаторов Golledge типа HC49 и GSX-213

#### Снижение динамической емкости ( $C1$ )

Динамическая емкость также пропорциональна площади электродов, и соответственно, сокращение размеров кристалла приводит к уменьшению емкости.

Примерное значение можно определить по формуле:

$$C1 = (0,126 \times A \times F) / n^3,$$

где  $C1$  — емкость, пФ;  $A$  — площадь электродов, мм<sup>2</sup>;  $F$  — резонансная частота, МГц;  $n$  — номер гармоники.

#### Изменение чувствительности подстройки ( $Ts$ )

К сожалению, в отношении кварцевого резонатора более точный термин, соответствующий общепотребительному Trim Sensitivity, подобрать трудно. Этот параметр в общих чертах характеризует отклонение частоты от номинальной в зависимости от отклонения величины емкостной нагрузки от рекомендуемой:

$$Ts = C1 / 2(C0 + C1)^2,$$

где  $C1$  — емкость нагрузки.

Как указано выше, величина динамической емкости уменьшается при использовании кристалла меньших размеров. В режиме параллельного резонанса динамическая емкость значительно меньше нагрузочной, и ее изменение не вносит значительного вклада в результат ( $C0 \ll C1$ ). Поэтому  $Ts$  снижается, так как сокращается  $C1$  (изменением  $C0$  пренебрегаем), если не предпринимаются дополнительные меры, учитывающие работу с резонатором малых размеров.

#### Изменение динамического сопротивления ( $R1$ )

Для рассматриваемого кварца такие параметры, как добротность  $Q$  и динамическое сопротивление  $R1$ , связаны соотношением  $Q = 1/\omega 1 C1 R1$  (где  $\omega 1$  — круговая частота последовательного резонанса). Динамическое сопротивление  $R1$  для частоты последователь-

ного резонанса обратно пропорционально активной площади кристалла. Площадь кристалла примерно совпадает с площадью электрода. Поэтому кварцы меньших размеров имеют более высокое значение динамического сопротивления  $R1$ . За счет роста динамического сопротивления происходит падение добротности, что может привести к неустойчивому запуску и даже срыву колебаний.

#### Зависимость резонансной частоты от уровня возбуждения (DLD, Drive Level Dependence) или мощности рассеивания

Под действием мощности, рассеиваемой в кварцевом резонаторе, изменяются как эквивалентное сопротивление, так и частотно-температурные, а также спектральные характеристики. Кроме этого, ускоряется старение кристалла и, главное, происходит уход частоты генерации. А при значительном превышении мощности рассеивания кристалл может даже разрушиться.

Особенно важна зависимость, возникающая при использовании кварца малых размеров и показывающая отклонение частоты резонанса в зависимости от уровня возбуждения. Этот эффект в основном вызван тем, что вследствие неравномерности распределения амплитуды колебаний кварца создается температурный градиент. В результате изменяется модуль упругости, что приводит к нежелательному изменению резонансной частоты.

На рис. 3 приведены сравнительные изменения частот резонансов двух кварцевых резонаторов: построены графики изменения частот параллельного резонанса и, соответственно, динамического сопротивления в зависимости от мощности возбуждения.

Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что динамическое сопротивление, так же как и частота резонанса, изменяется в зависимости от уровня возбуждения, что вызывает снижение добротности  $Q$ . А если к кварцу приложена чрезмерная мощность, то это может привести сначала к большому изменению частоты, а затем — к ускоренно-

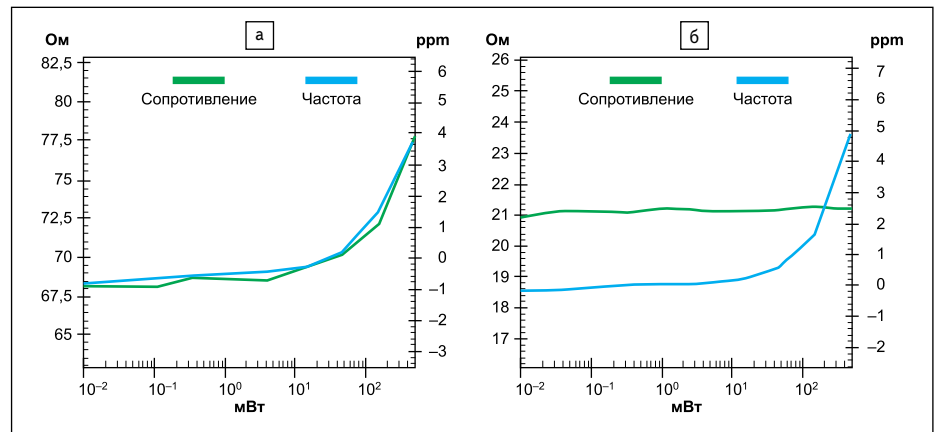


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты и динамического сопротивления от уровня возбуждения кристалла

му старению кристалла, то есть к постепенному изменению частоты с течением времени и даже к разрушению кристалла.

Чрезмерное увеличение уровня возбуждения приводит и к увеличению фазовых шумов. Поэтому важно избегать перевозбуждения для достижения малых уходов частоты резонанса, минимизации фазовых шумов. Кроме этого, перевозбуждение кварца может вызвать появление нежелательных гармоник, отрицательно влияющих на спектральную чистоту выходного сигнала и, соответственно, увеличение внеполосных излучений.

### Увеличение минимальной частоты резонанса

Минимальная частота кварца с АТ-срезом определенного размера (табл. 3) определяется влиянием нежелательных режимов резонанса, вызванных наличием колебаний в других плоскостях в дополнение к основному режиму. Они могут приводить даже к уменьшению активности в определенных условиях. Зачастую уменьшение активности проявляется в узких температурных диапазонах, поэтому при разработке устройства необходимо проверять устойчивость запуска и стабильность частоты во всем предполагаемом рабочем температурном диапазоне.

Таблица 3. Минимальная частота кварца при АТ-срезе

Корпус	Размер корпуса, мм	Минимальная частота кварца, МГц
HC49J	17,7×11×5,3	1,8
UM-1J	11,6×7,8×3,6	3,579
GSX-751	7,2×5,2×1,3	6
GSX-533	5,2×3,4×1,3	8
GSX-331	3,3×2,6×0,7	10
GSX-321	2,6×2,1×0,6	12
GSX-221	2,1×1,7×0,6	16
GSX-213	1,65×1,25×0,35	26

Более низкие частоты для миниатюрных корпусов дают кристаллы с другим срезом или применяющие другой режим резонанса. Но обычно такое решение имеет более низкую температурную стабильность частоты и более высокую стоимость. В качестве примера можно привести SL-срез, использующий режим колебания сдвига по контуру (а не колебаний по толщине, как у АТ-среза). Исключением является GT-срез, который позволяет получить низкую частоту с параметрами стабильности, аналогичными кварцам с АТ-срезом. Но значение R1 для кварцев с GT-срезом зачастую слишком высоко для практических применений.

### Пертурбации

Пертурбациями называют отклонения от идеальной частотно-температурной характеристики, которые могут быть вызваны как перевозбуждением кварца (чрезмерным возбуждением, или DLD), так и появлением нежелательных резонансов. Для большин-

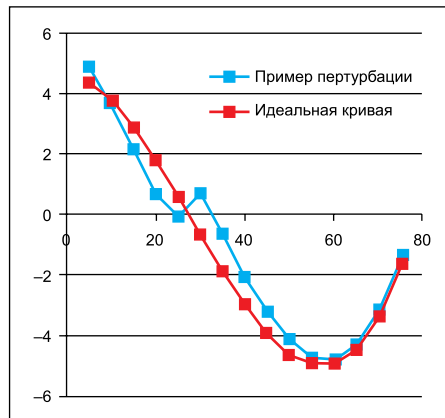


Рис. 4. Температурно-частотная характеристика кварца

ства кварцев с АТ-срезом температурно-частотная характеристика описывается полиномом третьего порядка с практической точностью 0,5 ppm.

Результаты измерения на рис. 4 показаны синим цветом. Красная линия представляет идеальную температурно-частотную характеристику. Из графика видно, что начиная с температуры +25 °С происходит отклонение от идеальной кривой, но количественное изменение имеет величину не более 2 ppm.

### Влияние асимметрии корпуса

Переход от типовых корпусов «лодочка», HC49 и аналогичных выводных к современным керамическим корпусам для поверхностного монтажа означает, что паразитная емкость между электродами кварца и «землей» корпуса различается (рис. 5). Это может привести к небольшим изменениям частоты генератора, в зависимости от того, как ориентирован компонент. Следует обратить внимание на корректную ориентацию корпуса при монтаже, соответствующую ориентации, примененной в процессе разработки. И необходимо помнить, что обычно производитель указывает характеристики кварцевого резонатора без учета ориентации корпуса на плате. Изменение ориентации корпуса на плате может привести к небольшим сдвигам частоты.

### Виброустойчивость

Если рассматривать кварцевые резонаторы с точки зрения защиты от удара и вибрации, то меньший вес небольших корпусов для по-

верхностного монтажа является преимуществом. Традиционная круглая кварцевая пластина требует трех или четырех точек крепления в большом корпусе, что предполагает большую площадь для контактных площадок во избежание повреждения от удара и вибрации. В современных корпусах кварца обычно крепится всего двумя каплями токопроводящего эпоксидного компаунда (с наполнением серебром), который также играет роль электрического соединения кристалла. Тем не менее кристаллы, предназначенные для автомобильных приложений или аппаратуры, созданной для эксплуатации в условиях повышенной вибрации или ударных нагрузок, имеют четыре точки крепления. Это обеспечивается за счет размещения двух дополнительных капель эпоксидной смолы с серебром поверх уже существующих двух. Увеличение надежности монтажа в данном случае происходит не за счет использования дополнительной точки крепления на пластине. И хотя такое крепление считается четырехточечным, кварц в данном случае крепится только в двух местах. Для ответственных применений используется крепление в пяти точках, при котором добавляется еще одна точка крепления (то есть фактически крепление является трехточечным).

### Изменения в проекте при использовании кварца меньшего размера

#### Снижение емкости нагрузки

Для обеспечения диапазона подстройки генератора требуются емкости меньшего номинала, используемые в качестве емкостей нагрузки. Также снижение емкости нагрузки может уменьшить требуемый уровень возбуждения кварца и, соответственно, сократить энергопотребление цепи генератора. Снижение размера корпуса кварца приводит к уменьшению размера контактных площадок корпуса, а значит, и к уменьшению емкости проводников на печатной плате.

#### Снижение уровня возбуждения

Кварцевый резонатор меньших размеров требует пониженного уровня возбуждения. Соответственно, понадобится коррекция уровня последовательным включением резистора. А потому в данном случае, если это возможно, необходимо запросить рекомендуемый уро-

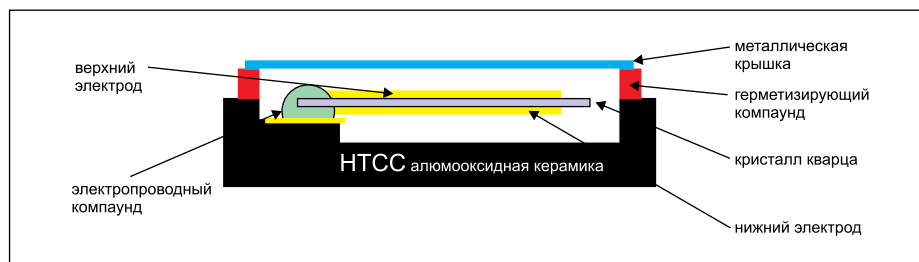


Рис. 5. Влияние асимметрии корпуса на емкость

вень возбуждения у производителя резонаторов или подобрать его экспериментально.

Как определить уровень возбуждения?

Уровень возбуждения может быть определен моделированием генератора с максимально ожидаемым значением используемого R1 в модели кварца. Если нет реалистичной модели поведения активной части кварца, тогда ток в кварце может быть измерен с помощью датчика тока с широкой полосой пропускания (стандартные датчики тока для измерительных приборов, как правило, ограничены диапазоном рабочей частоты до 15–20 МГц, и в данном случае придется дополнительно конструировать такую схему самостоятельно, что является довольно нетривиальной задачей). Если такого датчика у вас нет, тогда можно измерить напряжение на кварце — этого будет достаточно, чтобы определить уровень возбуждения кварца. При изменении напряжения на кварце нужно быть осторожным (учитывать входное сопротивление и импеданс пробника прибора) и не нагружать цепь при измерении. В идеальном случае шунтирующая емкость генератора должна быть временно уменьшена для компенсации емкости щупа.

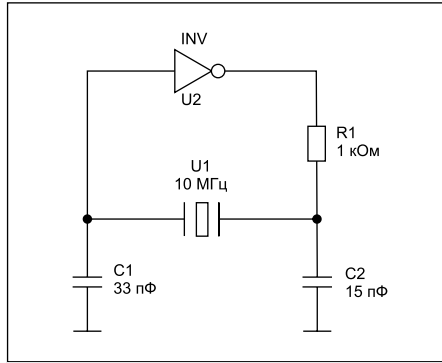


Рис. 6. Применение асимметричной емкости нагрузки

**Применение асимметричной емкости нагрузки**

Емкость нагрузки на выходе цепи резонатора C2 может быть в два раза меньше емкости нагрузки на входе (рис. 6). Это хороший вариант в случае, когда активная часть генератора имеет автоматическую регулировку усиления (APУ), устанавливающую уровень возбуждения. Результатом асимметрии является увеличение напряжения на выходе резонатора.

**Выбор более высокой рабочей частоты**

Для приложений, использующих PLL-синтезатор частот с программируемым коэффициентом деления для получения заданной сетки частот или необходимой частоты, частота задающего генератора должна быть выбрана с учетом доступности кварцевого резонатора на нужную частоту. Например, для корпуса 1,65×1,25×0,35 мм резонатора Golledge GSX-213 минимальная частота составляет 26 МГц.

**Литература**

1. Patela M. S., Yonga Y.-K., Tanaka M. Drive level dependency in quartz resonators. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309000055](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309000055)
2. Toudret L., Cosqueric L., Sanctorem B., Gufflet N. Activity Dips In Standard Oscillator. [www.escies.org/download/webDocumentFile?id=60979](http://www.escies.org/download/webDocumentFile?id=60979)
3. Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г. Кварцевые генераторы / Справочное пособие. Радио и связь, 1984.
4. Справочник по кварцевым резонаторам / Под ред. П. Г. Позднякова. Связь, 1978.
5. Альтшуллер Г. Б. Кварцевая стабилизация частоты. Связь, 1974.