

О подборе кварцевых резонаторов

В практике ремонта часто возникает необходимость замены кварцевого резонатора. Однако внимание при замене обычно обращается только на частоту. Остальные же параметры часто оказываются за пределами рассмотрения. В результате могут возникнуть проблемы. Поэтому в настоящей статье автор проясняет некоторые вопросы, возникающие при подборе кварцевых резонаторов.

Основные свойства кварцевых резонаторов

Кристалл кварца имеет механические и электрические характеристики. При его сжатии генерируется электрическое поле в направлении, перпендикулярном приложенному усилию. И наоборот, если к кристаллу кварца приложено электрическое поле, в нем возникают механические колебания в направлении, перпендикулярном приложенному электрическому заряду. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом, который и лежит в основе производства кварцевых резонаторов для электронной техники.

Пластины кварца заставляют вибрировать (колебаться), устанавливая ее между двумя электродами и прикладывая к ним переменное напряжение. Амплитуда таких колебаний достигает максимума при совпадении частоты приложенного переменного напряжения с резонансной частотой кварцевой пластины. Схему генератора с использованием кварцевого резонатора называют "генератором с кварцевой стабилизацией частоты".

Одним из замечательных свойств кварцевого резонатора является его высокая добротность Q . Этот параметр, если рассматривать его как механический, показывает, во сколько раз энергия, запасенная в резонаторе, превышает потери энергии на колебания:

$$Q = 2\pi \left(\frac{W_{\text{КВ}}}{W_{\text{потеря}}} \right). \quad (1)$$

Если же рассматривать добротность как электрическую величину, то она представляет собой реактивное индуктивное сопротивление на резонансной частоте, деленное на последовательное эквивалентное сопротивление потерь.

Кварцевые резонаторы с высокой добротностью имеют низкие потери энергии в процессе работы. Обычно добротность составляет 20...200 тыс., а у высококачественных резонаторов она может достигать 3 млн.

Другой важной характеристикой кварцевых резонаторов является их высокая частотная стабильность. Отклонение их резонансной частоты от номинального значения может быть вызвано двумя причинами: изменениями рабочей температуры и старением. И если отклонения, вызванные изменениями температуры, могут достигать $\pm 100\%$, то отклонения, вызываемые старением, составляют около $\pm 5\%$ в год.

Выбор кварцевого резонатора

К выбору кварцевого резонатора следует подходить очень внимательно, учитывая, какой погрешностью частоты должна обладать создаваемая схема. Чем выше требования к точности генерируемой частоты, тем сложнее и дороже будет устройство.

При создании схемы с использованием терморезистора как элемента термостабилизации, можно достичь отклонения частоты от номинала в пределах $\pm 2\%$ в месяц. А системы фазовой автоматической подстройки частоты требуют гораздо меньшей нестабильности частоты опорных колебаний.

Качество любой схемы, использующей кварцевые резонаторы, определяют их четыре основных параметра:

- отклонение частоты;
- стабильность частоты;
- старение;
- нагрузочная емкость.

Любой из этих параметров может быть изменен без влияния на другие. Такая независимость делает использование

кварцевых резонаторов еще более привлекательным. Однако изменение в лучшую сторону любого из перечисленных параметров ведет к удорожанию системы.

Отклонение частоты

Отклонение частоты для кварцевого резонатора измеряется при комнатной температуре (25°C). Этот параметр характеризует максимальное отклонение генерируемой частоты относительно ее номинального значения. Для большинства кристаллов он составляет миллионные доли от номинала. Например, если кварцевый резонатор на частоту 32768 Гц имеет паспортное отклонение частоты $\pm 20\%$, то при температуре 25°C частота его колебаний может измениться в пределах от 32768,65536 до 32767,34464 Гц. Кварцевые резонаторы с частотой 32768 Гц известны как "часовые", и такое отклонение частоты может привести к уходу часов на 1 минуту в течение месяца. Это отклонение можно представить выражением:

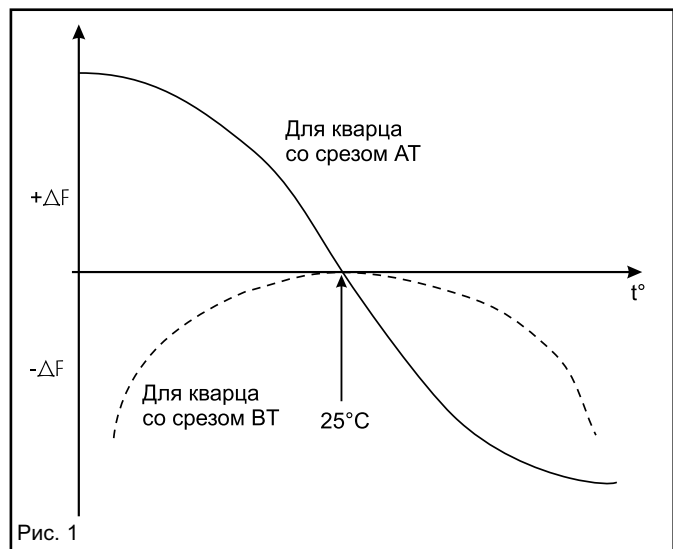
$$60 \frac{\text{с}}{\text{мин.}} \times 60 \frac{\text{мин.}}{\text{час}} \times 24 \frac{\text{часа}}{\text{день}} \times 30 \frac{\text{дн.}}{\text{мес.}} \times \left(\pm \frac{20}{1000000} \right) = \pm 51,84 \frac{\text{с}}{\text{мес}}$$

Стабильность частоты

Стабильность частоты кварцевого резонатора зависит от температуры окружающей среды и вида среза кристалла. Наибольшее применение нашли кристаллы со срезами АТ и ВТ. Кривые их температурной стабильности отличаются (рис. 1). Это необходимо учитывать при проектировании устройств.

Кривая характеристики кристалла со срезом АТ представляет собой график кубической функции. Из него видно, что кривая характеристики может перемещаться в вертикальном направлении в пределах допустимого отклонения частоты.

Кристаллы со срезом ВТ имеют более низкую резонансную частоту, а кривая их характеристики имеет форму параболы. При изменении окружающей температуры резонансная частота такого кристалла может изменяться только в сторону уменьшения.



Старение

Старение кварца – это естественный физический процесс. В этом случае резонансную частоту кварцевого резонатора можно рассматривать как функцию от времени. Старению кварца способствуют механические воздействия на его корпус, примеси внутри корпуса. Этот процесс сдерживает щадящая эксплуатация резонатора, при которой уровни напряжения, прикладываемого к нему, малы.

Нагрузочная емкость

Для схем с параллельным резонансом задается такой параметр, как нагрузочная емкость. Если нагрузочная емкость схемы не согласуется с нагрузочной емкостью кварцевого резонатора, имеет место сдвиг резонансной частоты.

Последовательный и параллельный резонанс

Не все радиолюбители и специалисты правильно понимают суть этого вопроса. Не существует параллельного или последовательного резонанса кварцевого резонатора. Но каждый кварцевый резонатор имеет разные частоты параллельного и последовательного резонанса. При калибровке резонатора его проверяют на частоте последовательного или параллельного резонанса. Частота параллельного резонанса выше частоты последовательного.

Большинство генераторов работают в режиме возбуждения кварцевого резонатора на частоте параллельного резонанса. Примеры таких схем: схема Пирса, схема Колпица, схема Клаппа. Возбуждение на частоте последовательного резонанса, как правило, не применяется.

На рис. 2 изображена эквивалентная схема кварцевого резонатора. Элементы C1, R1, L1 представляют эквивалент непосредственно пластины кварца, а C0 – шунтирующая (статическая) емкость резонатора. Она обусловлена конструктивными особенностями резонатора и составляет несколько пикофард. L1 – это индуктивность подвижной массы кристалла. Она может достигать тысяч генри. C1 – емкость подвижной массы кристалла. Ее значение – несколько фемтофард. R1 – эквивалентное последовательное сопротивление резонатора при генерации. Оно характеризует механические потери при генерации и может принимать значения от нескольких десятков килоом. Если R1 имеет большую величину, резонатор теряет меньше энергии

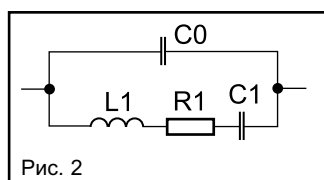


Рис. 2

в процессе генерации. Это облегчает запуск генератора и обеспечивает стабильность его работы.

На последовательное эквивалентное сопротивление не оказывает влияния емкость C0. Частоту последовательного резонанса кварцевого резонатора можно определить из формулы:

$$F_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Когда резонатор установлен на печатную плату, его эквивалентная схема изменяется и принимает вид, изображенный на рис. 3. Из рисунка видно, что в схему добавлена емкость CL. Эта емкость паразитная. Она является комбинацией емкостей CL1 и CL2 – паразитных емкостей монтажа и нагрузки резонатора. В этом случае резонансная частота смещается. Этот параметр называют резонансной частотой с подключенной параллельно нагрузкой F_Р:

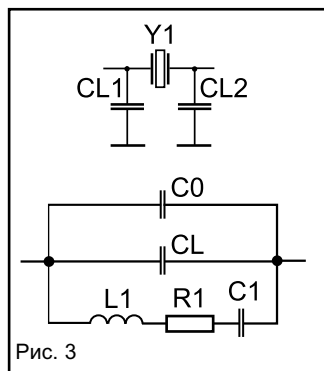


Рис. 3

$$F_P = F_S \sqrt{1 + \frac{C1}{C0 + CL}} \quad (3)$$

В большинстве случаев параметр F_Р приводится в перечне технических данных на резонаторы. В заводских условиях резонаторы калибруют с использованием специальной нагрузочной емкости. Ее величина указывается в паспортных данных резонаторов. Если реальная емкость нагрузки не согласуется с емкостью, указанной в паспортных данных, то генерация колебаний осуществится на частоте, отличной от F_Р. Следует также всегда помнить, что частота параллельного резонанса всегда выше частоты последовательного резонанса.

Отклонение частоты и емкость нагрузки

При несоответствии емкости нагрузки кварцевого резонатора той, которая указана в паспорте, рабочая частота генератора будет отличаться от указанной в паспортных данных. В таком случае отклонение частоты DF_Р можно описать формулой:

$$\Delta F_P = F_{P1} - F_{P2}; \quad (4)$$

или

$$\Delta F_P = F_S \sqrt{1 + \frac{C1}{C0 + CL_{пасп.}}} - F_S \sqrt{1 + \frac{C1}{C0 + CL_{ген.}}} \quad (5)$$

В формуле F_{Р1} – паспортное значение частоты, а F_{Р2} – реальное значение. На практике такая погрешность часто является незначительной и в расчет не принимается. Однако при использовании кварцевого резонатора в схемах точного отсчета интервалов времени вносимую погрешность частоты следует обязательно учитывать.

Для того чтобы снизить влияние паразитных емкостей, используют подстроечные конденсаторы. Если реальная емкость нагрузки меньше паспортной, то подстроечный конденсатор включают параллельно резонатору. Если же реальная емкость больше паспортной, то его включают последовательно с резонатором.

Выбор кристалла

Как было сказано выше, кристаллы могут быть либо со срезом АТ, либо со срезом ВТ. Учитывая температурные характеристики таких кристаллов, можно сделать вывод, что предпочтительнее использовать кристаллы со срезом АТ, поскольку при изменении температуры окружающей среды рабочая частота кристалла со срезом ВТ всегда понижается. К сожалению, на низких частотах (ниже 1 МГц) выбора не остается, так как в этой области, в основном, используют резонаторы со срезом ВТ.

Режимы работы кварцевых резонаторов

Режим работы кварцевых резонаторов зависит от частоты. Как правило, они работают на основной частоте в полосе до 50 МГц, а на частотах свыше 50 МГц кварц резонирует на обертонах. Частоты обертонов не являются верхними гармониками основной частоты, хотя и расположены близко от них. На практике часто используют умножение основной резонансной частоты кварцевого резонатора. Этот способ более прост и эффективен, чем применение кристаллов, работающих в обертоновом режиме. Почему? Это очевидно, учитывая недостатки кварцевых резонаторов на обертонах.

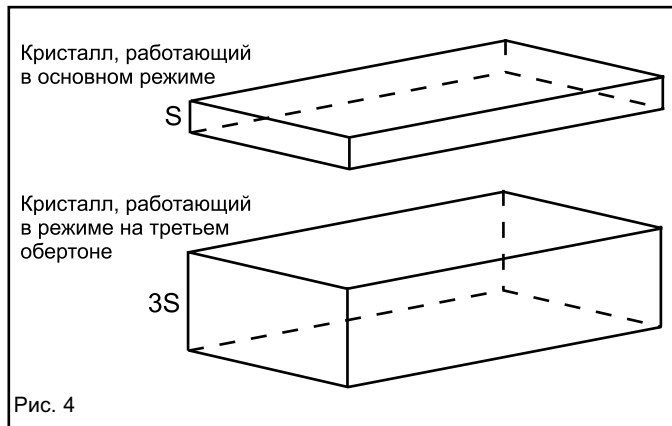
Резонансная частота кварцевого резонатора обратно пропорциональна толщине пластины кварца. Ограничение верхнего предела резонансной частоты до 50 МГц вызвано прежде всего трудностью производства тонких пластин и механических держателей для них. Кварцы, предназначенные для работы на обертонах, имеют большую толщину, кратную толщине кристалла, работающего на основной частоте. Например, резонатор, работающий на третьем обертоне (грубо – утроение основной частоты), имеет толщину пластины, в три раза превышающую толщину пластины ре-

зонатора, работающего на основной частоте (рис. 4). Генератор, использующий кварц, работающий в обертоновом режиме, должен иметь специальную конструкцию. В частности, фильтр, подавляющий основную резонансную частоту кварца. Другой недостаток обертоновых резонаторов – это более высокое последовательное эквивалентное сопротивление и меньшая добротность, что затрудняет запуск генератора и снижает устойчивость колебаний. Третий недостаток – возможность запуска в режиме случайных колебаний, частота которых далека от рабочей частоты.

Эксплуатация кварцевых резонаторов

Кварцевые резонаторы выпускаются в различных корпусах: металлических, стеклянных, пластмассовых, для обычного печатного и поверхностного монтажа. Лучшим выбором можно назвать пластмассовые корпуса, потому что кварцевый резонатор в них заключен сначала в металлический корпус и уже потом в пластмассовый.

При размещении кварца на плате следует придерживаться правила: чем ближе к генератору, тем лучше. Рядом с резонатором не должно проходить дорожек, по которым передаются другие сигналы, способные вносить помехи в ра-



боту кварцевого генератора. Все точки генератора должны быть хорошо заземлены.

Дмитрий Хрусталеv,
 pierce_arrow@mtu-net.ru

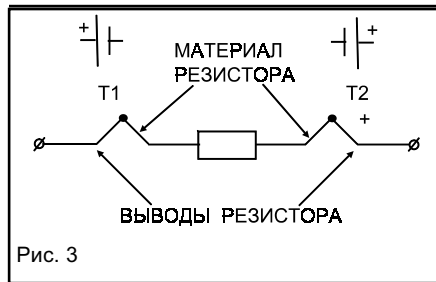


Рис. 3

ным разными производителями, может дать термо-ЭДС вплоть до 0,2 мкВ/°С.

Рассмотрим модель резистора, представленную на рис. 3. Соединение между материалом резистора и проводниками формирует две термопары. Термо-ЭДС может достигать значений 400 мкВ/°С для угольных резисторов. В то же время существуют специально сконструированные резисторы, у которых эта термо-ЭДС крайне низка, всего 0,05 мкВ/°С [1]. Металлопленочные резисторы (RN-типов) характеризуются значением термо-ЭДС, примерно равным 20 мкВ/°С.

Термопарные эффекты не сказываются при работе с переменными сигналами, или когда резисторы находятся в условиях постоянства температуры, но рассеяние тепла на резисторе, равно как и его ориентация относительно источника тепла, может привести к тому, что один из его концов окажется теплее другого, и термо-ЭДС на концах окажутся разными. В итоге, он превратится в источник дополнительной ЭДС, равной разности упомянутых термо-ЭДС, и это приведет к ошибкам в системе, работающей на постоянном токе. Например, если мы используем обычные металлопленочные резисторы, температурное изменение на 1°С вызовет нескомпенсированную термо-ЭДС величиной 20 мкВ, которое вполне сопоставимо с приведенным ко входу смещением точного операционного усилителя, такого как OP177 или AD707, и уж совершенно неприемлемо при использовании сверхвысокоточных усилителей с прерыванием (chopper-усилителей).

Рис. 4 показывает, как ориентация резистора может вызвать нескомпенсированную термо-ЭДС. Установка резистора вертикально с целью уменьшить занимаемую им площадь поверхности платы может привести к появлению температурного градиента вдоль его поверхности, особенно,

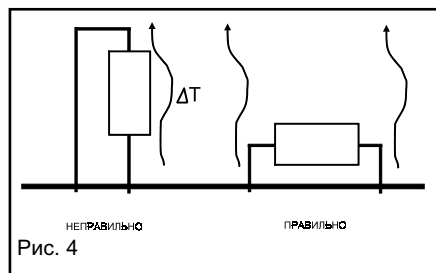


Рис. 4

если он и сам рассеивает заметное количество тепла. Установка резистора параллельно плате снимает эту проблему, если вдоль его оси не проходит поток воздуха. Ориентируя ось резистора перпендикулярно воздушному потоку, можно сохранить одинаковую температуру концов резистора, сведя к нулю погрешности за счет термо-ЭДС.

Рис. 5 показывает, как расположить резистор на вертикально установленной печатной плате, вдоль которой от низу вверх распространяется конвективный воздушный поток. Как и в предыдущем случае, ось сопротивления должна быть перпендикулярна конвекционному потоку, чтобы снизить нескомпенсированную термо-ЭДС. Отметим, что вследствие малых размеров резисторов для поверхностно-

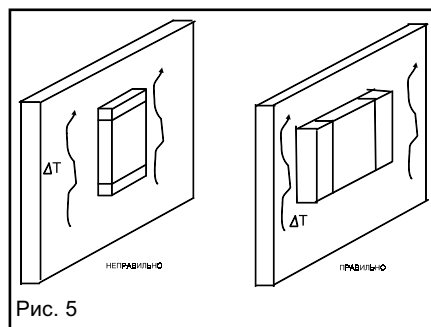


Рис. 5

го монтажа, термопарный эффект в них выражен гораздо ниже, чем у вышеупомянутых типов резисторов в традиционном исполнении с гибкими выводами, т. к. расстояние между выводами чип-резисторов около 1 мм, а на таких расстояниях перепады температуры за счет конвекции очень малы.

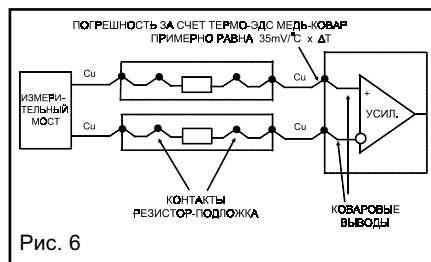


Рис. 6

Простая цепь, показанная на рис. 6, иллюстрирует проблему паразитных термопар. Здесь мы имеем удаленный мост, сигнал с которого усиливается инструментальным усилителем, каждый вход которого снабжен токоограничивающим резистором. Каждый резистор имеет 4 термопары: две находятся внутри резистора, а две там, где выводы резистора соединяются с медными проводниками. Еще одна пара термопар расположена в местах соединения медных проводников с коваровыми ножками корпуса инструментального усилителя. Соединение "медь/ковар" имеет термо-ЭДС порядка 35 мкВ/°С.

Большинство литых пластмассовых ИС используют в качестве выводов медные проводники соответствующего размера (например, инструментальный усилитель AD620).

Вдобавок, медный провод имеет коэффициент температурного сопротивления (у проводника 30-го калибра он составляет приблизительно 0,385%/°С), который может внести погрешность, если температура проводов существенно различается или если они разной длины. В нашем случае, однако, эта погрешность незначительна, т. к. по проводам течет минимальный ток.

Очевидно, что подобная простая цепь должна быть хорошо проработана не только с точки зрения электрических сигналов, но и в плане тепловых эффектов, без чего добиться желаемой прецизионности невозможно. В этом смысле полезны сокращение числа проводников из различных материалов, минимизация термических градиентов путем правильного расположения осей резисторов относительно направления движения теплового потока или блокирование воздушного потока к компонентам с использованием металлических или пластиковых экранов, сокращение рассеиваемой мощности в чувствительных приборах, правильный отбор прецизионных резисторов и подбор числа соединений в каждом плече дифференциального сигнала, вплоть до введения так называемых "dummy" компонентов, если требуется. Розетки, соединители, выключатели или реле в сигнальных цепях могут вводить нестабильные контактные соединения, а также "неизвестные" термопарные соединения которые также могут помешать достичь требуемой точности. Поэтому их следует по возможности избегать.

Walt Kester, Walt Jung and James Bryant
Перевод и обработка
Александра Фрунзе и
Андрея Асташкевича,
alex.fru@mtu-net.ru

Литература

1. RCD Components, Inc., 520 E. Industrial Park Drive, Manchester NH, 03109, 603-669-0054, <http://www.rcd-comp.com>.
2. Steve Sokolov and James Wong, High-Accuracy Analog Needs More Than Op Amps, *Electronic Design*, Oct. 1, 1992, p. 53.
3. Doug Grant and Scott Wurcer, *Avoiding Passive Component Pitfalls, The Best of Analog Dialogue*, Analog Devices, 1991, p. 143.
4. Brian Kerridge, *Elegant Architectures Yield Precision Resistors*, *EDN*, July 20, 1992.