

КВАРЦЕВЫЕ АВТОГЕНЕРАТОРЫ: РАЗНОВИДНОСТИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В.Кочемасов, к.т.н., Е.Хасьянова

УДК 621.373.5
БАК 05.27.00

Автогенераторы (АГ) – неотъемлемая часть любой радиотехнической системы. Их основное назначение – создание стабильных колебаний заданной частоты синусоидальной или прямоугольной формы. Для стабилизации частоты в автогенераторах используются резонаторы разных типов: кварцевые, на поверхностных акустических волнах (ПАВ), МЭМС, ЖИГ, диэлектрические и др. Автогенераторы на основе кварцевых резонаторов – одни из наиболее часто применяемых, что обусловлено их высокой добротностью, низкими значениями фазовых шумов и джиттера, возможностью получения колебаний фиксированной частоты с высокой температурной и временной стабильностью частоты. Рассмотрим основные типы, особенности, характеристики и возможные применения современных кварцевых автогенераторов.

В зависимости от области применения кварцевые автогенераторы производятся как без дополнительной стабилизации частоты (ХО), так и с коррекцией параметров: автогенераторы с термокомпенсацией (ТСХО), термостатированием (ОСХО) или двойным термостатированием (ДОСХО), вакуумированные термостатированные автогенераторы (ЕМХО) (рис.1). В системах с фазовой автоподстройкой частоты применяются управляемые напряжением кварцевые автогенераторы (VCХО). При необходимости получения более высокого показателя частотно-температурной стабильности VCХО могут помещаться в термостат (VCOСХО) или включать

в себя термокомпенсацию (TCVCХО/VCTCХО). Отметим особенности кварцевых автогенераторов различного типа.

ХО (Crystal oscillator) – кварцевый автогенератор. Такие генераторы представляют собой трехточечную схему с усилительным элементом, в которой кварцевый резонатор применяется как эквивалентная индуктивность. Их частотно-температурная стабильность находится в диапазоне 15–100 ppm. В зависимости от типа среза кварцевого резонатора и точности процесса его производства различаются автогенераторы общего назначения и прецизионные.

VCХО (Voltage Controlled Crystal Oscillator) – управляемые напряжением кварцевые автогенераторы – с перестраиваемой выходной частотой. Для них характерны большие значения показателя фазового шума по сравнению со стандартными кварцевыми автогенера-

¹ ООО "Радиокомп", генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

² ООО "Радиокомп", м.н.с., alena@radiocomp.ru.

торами. Частотно-температурная стабильность составляет 15–100 ppm.

ТСХО (Temperature Compensated Crystal Oscillator) – термокомпенсированные кварцевые автогенераторы. В простейшем случае для компенсации температурного сдвига частоты в таких устройствах применяются термисторы. Возможны также аналого-цифровая (ADТСХО), цифровая или микропроцессорная (DТСХО или MСХО) виды термокомпенсации. Значение частотно-температурной стабильности равно 0,1–5 ppm в температурном диапазоне –40...85 °С.

ОСХО (Oven Controlled Crystal Oscillator) – термостатированные кварцевые автогенераторы и ДОСХО (Double Oven Controlled Crystal Oscillator) – кварцевые автогенераторы с двойным термостатированием. Отличаются наилучшей частотно-температурной стабильностью по сравнению с другими типами кварцевых автогенераторов, а также весьма низким значением фазовых шумов. Например, компания Pascall Electronics выпускает ОСХО с показателем фазового шума L = –178 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от частоты генерации. Аналогичный показатель у продукции компании NEL составляет –185 дБн/Гц. Плата за улучшение стабильности частоты – увеличение цены, энергопотребления и массогабаритных показателей.

EMХО (Evacuated Miniature Oven Controlled Crystal Oscillator) – вакуумированные термостатированные кварцевые автогенераторы. От предыдущего типа устройств отличаются меньшими размерами и энергопотреблением. По показателю частотно-температурной

стабильности находятся между ОСХО и ТСХО. Их отличительная особенность – устойчивость к радиации и другим внешним воздействиям.

Основные характеристики автогенераторов – диапазон возможных значений номинальных частот ($f_{ном.}$), стабильность номинальной частоты ($\Delta f/f$, ppm или ppb) при изменении внешних параметров, уровень фазовых шумов и джиттера, тип выходного сигнала и значение напряжения питания.

Номинальная частота ($f_{ном.}$). Значение и стабильность этого параметра обязательно указываются в спецификации автогенератора. С целью повышения диапазона $f_{ном.}$ применяют режим возбуждения колебаний на третьей или пятой гармониках.

Показатели стабильности в общем случае состоят из трех основных компонентов: начальная точность установки частоты, частотно-температурная и долгосрочная стабильность частоты. Эти показатели определяются параметрами кварцевых резонаторов [1].

Начальная точность установки частоты ($f_{калибр.}$) определяется как диапазон возможных отклонений частот от заявленной в спецификации частоты при температуре 25 °С на момент продажи автогенератора.

Частотно-температурная стабильность ($f(T^{\circ}C)$) – максимально возможный уровень отклонения частоты автогенератора в рабочем температурном диапазоне. Измеряется в миллионных (ppm) или миллиардных (ppb) долях. Эта характеристика является среднесрочным показателем стабильности частоты, интервал ее измерения колеблется в пределах от нескольких минут до нескольких часов.



Рис.1. Основные типы и области применения кварцевых автогенераторов. В показателе стабильности частоты ($\Delta f/f$) учитывается стабильность частоты в рабочем диапазоне температур (–40...75 °С)

Долговременная стабильность (старение) показывает изменение частоты генерации кристалла с течением времени при условии, что остальные параметры остаются неизменными. При измерении этого параметра не учитываются условия внешней среды. Интенсивность старения замедляется с течением времени.

Фазовыми шумами называют стохастические флуктуации, обусловленные фликкер-шумом, тепловыми и дробовыми шумами. Основным определением фазового шума является значение спектральной плотности мощности фазовых флуктуаций в заданной полосе частот $S_\phi(f_m)$ (измеряется в $\text{Рад}^2/\text{Гц}$). В спецификациях автогенераторов фазовый шум определяется как отношение спектральной плотности мощности шума при заданной отстройке от центральной частоты к полной мощности колебания $L(f_m) = 1/2 S_\phi(f_m)$. Такая аппроксимация справедлива, если общая пиковая девиация фазы много меньше 1 рад [2]. Размерность фазового шума в этом случае – дБн/Гц.

Значения данного показателя для кварцевых АГ Vectron International лежат в диапазоне $-167... -123$ дБн/Гц при отстройке от частоты генерации в 10 кГц (рис.2) [3]. Фазовые шумы автогенераторов, выпускаемых компаниями "Мэджик Кристалл" и Crystek, равны соответственно $-170...145$ дБн/Гц [4] и $-164... -120$ дБн/Гц [5]. Наименьшими значениями $L(f_m)$ отличаются термостатированные кварцевые автогенераторы компаний Pascall Electronics и NEL (см. выше).

Джиттер характеризует шумовые показатели во временной области. Согласно определению Международного союза электросвязи (International Telecommunication Union, ITU), джиттером называются кратковременные изменения значащих моментов цифрового сигнала во временной области по сравнению с идеальным значением (рис.3) [6].

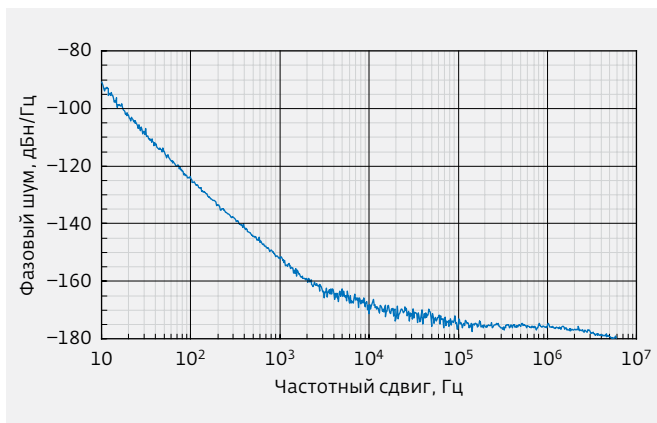


Рис.2. Значения фазового шума для кварцевого автогенератора РХ-990 компании Vectron International с номинальной частотой 120 МГц

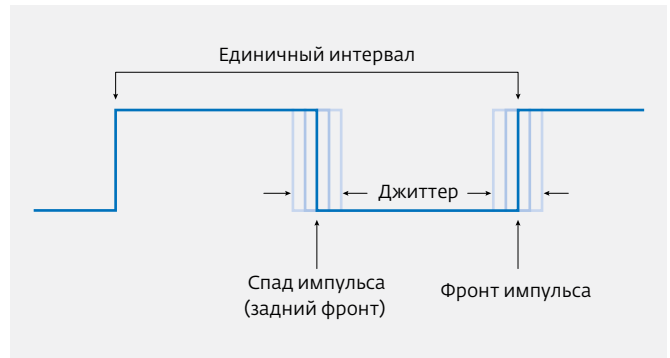


Рис.3. Смещение фронта импульса вследствие воздействия шумов

Джиттер может выражаться в единичных интервалах, в градусах, в абсолютных временных единицах (последнее чаще всего указывается в спецификации). Как правило, для измерения джиттера задается опорный фронт синхроимпульса, с которым сравниваются фронты остальных импульсов и на основании этих данных вычисляются среднеквадратическое и пиковое значения джиттера. Кроме того, среднеквадратическое значение джиттера (σ_{rms}) может быть выражено из значения фазовых шумов ($S_\phi(f_m)$ или $L(f_m)$). Для этого используются формулы пересчета [7]:

$$\sigma^2 = \int_{f_{m1}}^{f_{m2}} S_\phi(f_m) df_m = 2 \int_{f_{m1}}^{f_{m2}} L(f_m) df_m, \text{ рад}^2$$

$$\sigma_{rms} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{2\pi f_{НОМ}}, \text{ с,}$$

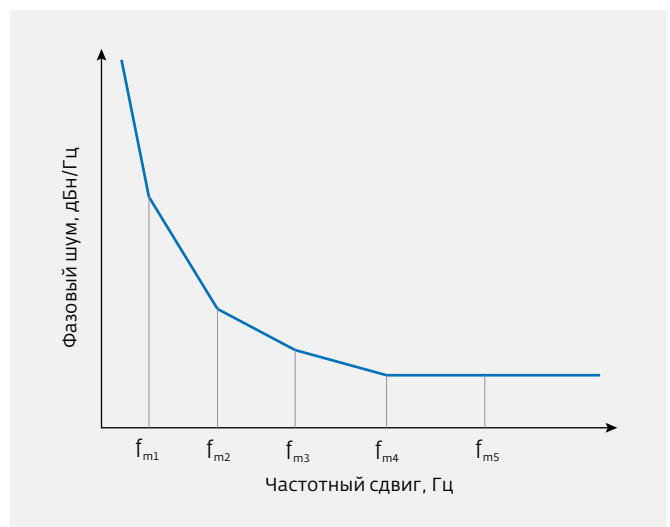


Рис.4. Разбивание графика спектральной плотности мощности фазовых шумов на линейные участки для последующего вычисления джиттера

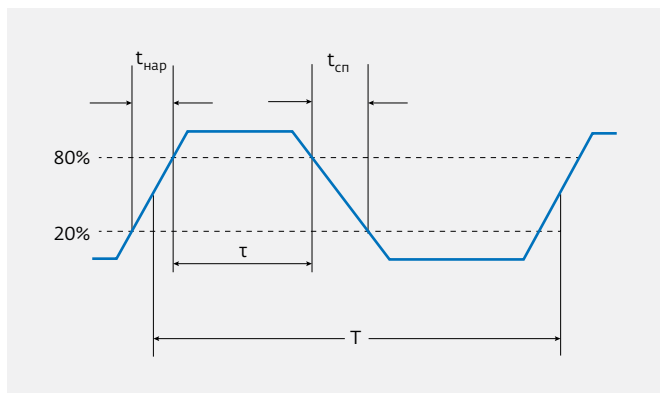


Рис.5. Трапецеидальный выходной сигнал автогенератора

где σ^2 – дисперсия фазовых шумов, f_{m1} и f_{m2} – значения частотного сдвига от частоты генерации ($f_{ном}$), в пределах которых вычисляется значение джиттера (рис.4).

В спецификации, как правило, указывается среднеквадратическое значение уровня флуктуации фронта за период. Для современных генераторов значение этого показателя находится в пределах 0,5–20 пс в частотном диапазоне от 12 кГц до 20 МГц. У автогенератора VC-708 компании Vectron джиттер в этом диапазоне еще меньше – 47–100 фс.

Поскольку автогенераторы часто применяют в качестве опорного источника в тактовых генераторах, при их выборе стоит обращать внимание не только на значение джиттера, но и на показатели времени нарастания ($t_{нар}$) / спада ($t_{сп}$) фронтов импульса и симметричности (рис.5). Симметричность

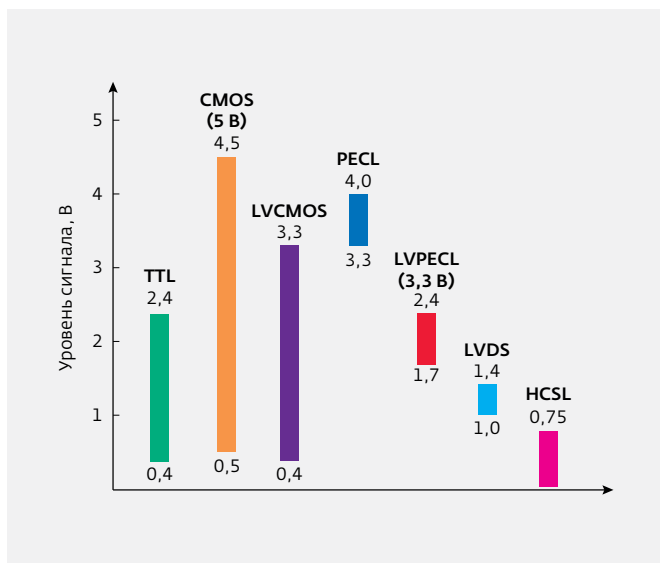


Рис.6. Уровни различных сигналов

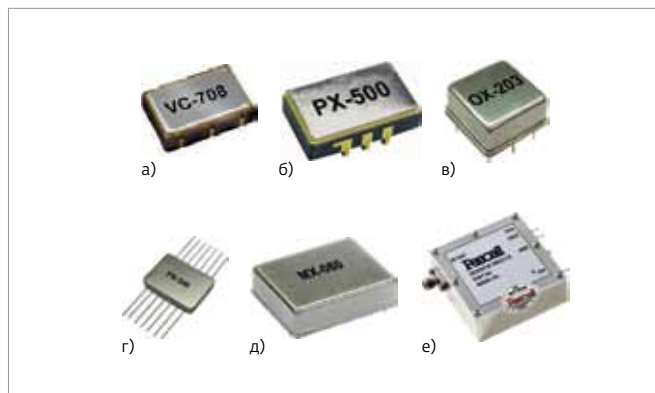


Рис.7. Примеры возможных вариантов корпусирования кварцевых автогенераторов: а) керамический SMD 5×7×1,8 мм; б) керамический выводной SMD в 4-pin DIP; в) 4-pin DIP; г) 14-pin DIP; д) металлический SMD 51×41×14,2 мм; е) модуль 51,0×51,0×19,0 мм

(или коэффициент заполнения) определяется как отношение длительности импульсов (τ) к периоду их следования (T), выраженное в процентах. Большинство компаний-производителей предлагают генераторы с показателем симметричности от 40 до 49%.

Выходные сигналы автогенераторов могут быть синусоидальными, синусоидальными с ограничением или трапецеидальными (CMOS, PECL, LVPECL, LVDS, HCSL и др.). В последнем случае уровни выходного сигнала зависят от вида используемой логики (рис.6) [8].

Кварцевые автогенераторы выпускаются для различных радиоэлектронных систем: автомобильная электроника, авиационная и космическая техника, измерительная и тестовая аппаратура и др. Их корпусирование выполняется различными способами (рис.7).

Для военной и аэрокосмической промышленности, авионики и ряда других отраслей нужны автогенераторы, работающие при быстроменяющихся условиях

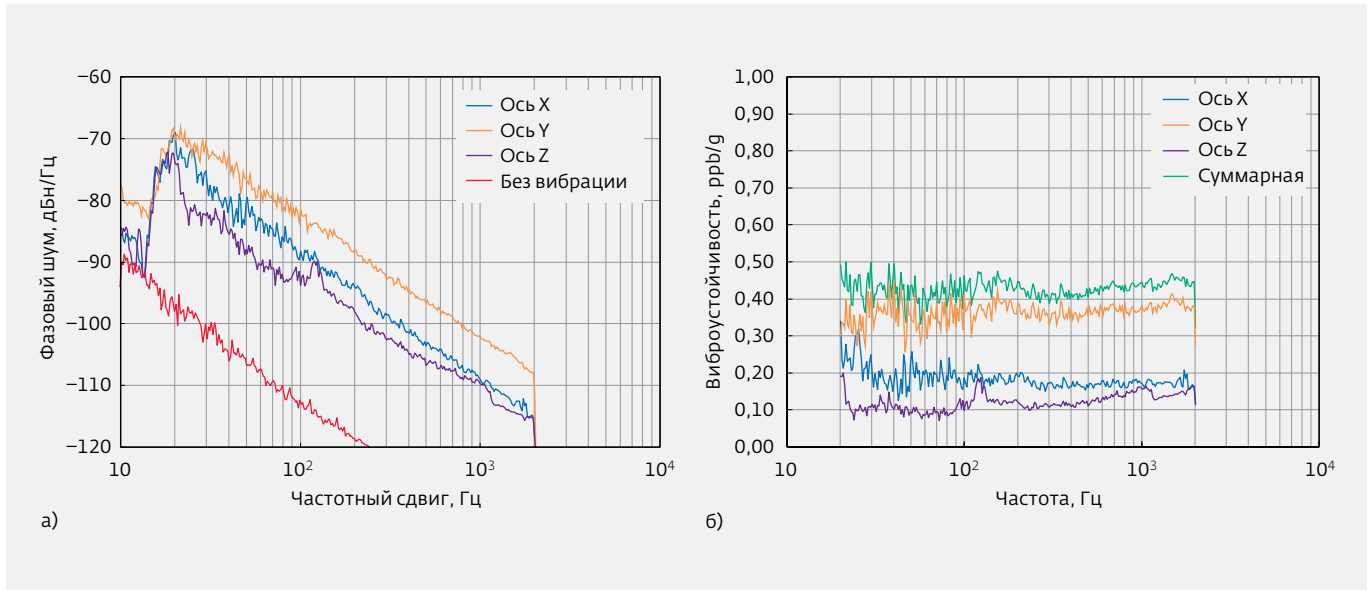


Рис.8. Показатели виброустойчивости: а) изменение фазовых шумов при воздействии вибрации; б) зависимость виброустойчивости от частоты вибрации. Данные представлены для PX-508 с частотой генерации 120 МГц

и перегрузках. Поэтому при производстве техники с жесткими требованиями к качеству автогенератор выбирают с учетом значений *ударопрочности* и *виброустойчивости* (*G-sensitivity*). В устройствах общего назначения эти параметры не так важны, поскольку они используются в более щадящих условиях.

Ударопрочность – способность резонатора, а следовательно и автогенератора, выдерживать механические воздействия определенной силы. Такие воздействия могут приводить не только к ухудшению частотной стабильности, но и к механическим повреждениям резонатора. Для повышения ударопрочности применяется специальное корпусирование резонаторов с тремя или четырьмя точками опоры [1], что позволяет выдерживать удары в 1000–20000 г, в то время как двухточечное крепление в керамическом корпусе для поверхностного монтажа выдерживает удары 50–200 г.

Виброустойчивость определяется как изменение частоты генерации в зависимости от уровня приложенной к автогенератору вибрации (измеряется в ppb/g). Поскольку кварцевый резонатор работает на основе обратного пьезоэлектрического эффекта, то дополнительное давление на резонатор изменяет его рабочую частоту и увеличивает значения фазовых шумов (рис.8а) [9]. Для определения виброустойчивости автогенератор помещается в тестовую установку и подвергается воздействию вибрации заданной частоты. Измерения ведутся поочередно по трем

осям. Результаты представляются в виде графиков зависимости виброустойчивости от приложенной частоты вибрации (рис.8б) [9].

Для каждого из применений автогенераторов существует свой набор наиболее важных из вышеперечисленных параметров. Правильный выбор автогенератора с нужными параметрами в сочетании с оптимальным схемотехническим решением позволит создать конечные устройства, отвечающие требованиям, предъявляемым к конкретной разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кочемасов В.Н., Хасьянова Е.Р.** Кварцевые резонаторы – особенности и области применения // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ. 2015. № 10. С. 106–112.
2. **Бельчиков С.** Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или Борьба за децибелы // Компоненты и Технологии. 2009. № 5. С. 139–145.
3. www.vectron.com/products/xo/PX-990.pdf
4. magicxtal.com/products/
5. www.crystek.com/home/crystek/default.aspx
6. www.vectron.com/products/literature_library/jitter_in_clock_sources.pdf
7. **Creda R.M.** Understanding Quartz Crystals and oscillators. – Artech House. – 2014, 299 pp.
8. www.vectron.com/products/literature_library/Signal_Types_and_Terminations.pdf
9. www.vectron.com/products/xo/px-508.pdf