

ПРЕЦИЗИОННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ И ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

АО "Морион" – известная во всем мире российская фирма в области разработки и серийного производства прецизионных пьезоэлектронных приборов стабилизации и селекции частоты – кварцевых генераторов (КГ), фильтров и резонаторов (КР), предназначенных для средств телекоммуникаций, управления и навигации, аварийно-спасательной и контрольно-измерительной техники. Комплекс работ, проведенных в АО "Морион" в последнее время, позволил значительно улучшить технические характеристики основных видов термостатированных КГ, включая высокочастотные, а также термокомпенсированных КГ со стабильностью $\sim 10^{-7}$ при минимальных времени готовности и энергопотреблении.

Стабильность частоты электрических колебаний играет решающую роль в обеспечении важнейших качественных показателей современных радиоэлектронных комплексов. Отсюда и значение прецизионных кварцевых резонаторов и генераторов. За последние годы прогресс в их технических характеристиках, реализованный в АО "Морион", очень значителен. На серийных приборах стала реальной эксплуатационная стабильность частоты на уровне 10^{-10} и кратковременная 10^{-12} . В АО "Морион", выполнен полный цикл "исследования–разработки–серийное (и крупносерийное!) производство" по ряду направлений:

- прецизионные и ультрапрецизионные кварцевые резонаторы, включая высокочастотные;
- прецизионные и ультрапрецизионные кварцевые генераторы, включая генераторы наивысшей стабильности частоты (ультрапрецизионные); маломощные и ультрамаломощные; миниатюрные; высокочастотные; стойкие к особо жестким внешним воздействующим факторам;
- высокостабильные генераторы с минимальными временем готовности и энергопотреблением.

Ключевые составляющие проведенных работ – технология, оборудование и создание серийного и крупносерийного производства по каждому из направлений. Без них качество, конкурентоспособность, репутация и шансы на мировом рынке остаются абстрактными категориями.

Я.Вороховский, д.т.н.
yakov@morion.com.ru

Теперь более подробно по перечисленным направлениям.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ И УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Кварцевый резонатор в значительной мере определяет важнейшие характеристики генератора – эксплуатационную стабильность частоты, фазовые шумы, стойкость к внешним воздействующим факторам (ВВФ). Поэтому технологии, конструированию и производству резонаторов придается первостепенное значение. В диапазоне частот от 4,096 до 128 МГц разработаны прецизионные КР двухповоротных срезов семейства $ухл/\pm\varphi^{\circ}/+\theta^{\circ}$, в частности SC (с $\varphi=21^{\circ}56'$), его модификаций и других родственных по кристаллографической ориентации срезов. Для обеспечения должной стабильности частоты и добротности КР выполнялись с колебаниями на 3-м или 5-м обертонах. В зависимости от размеров кварцевых кристаллических элементов использовались стандартные корпуса – как плоские (НС43 и НС45), так и круглые (НС35, НС37 и НС40). На выбор корпуса КР влияют также требования по стойкости к механическим воздействиям.

Для прецизионных КР, еще в большей мере, чем для генераторов, – и качество, и в целом конкурентоспособность определяются технологией серийного производства, соответствующим оборудованием и производственной инфраструктурой. Основное внимание было сосредоточено на ключевых этапах технологии КР:

- точность кристаллографической ориентации: серийно обеспечивается до $\pm 7,5...10''$, что сводит разброс температурно-частотных характеристик КР к минимуму, резко улучшая и экономику производства, и реализуемую стабильность частоты;
- формообразование кристаллических элементов: плоско-выпуклые кристаллические элементы – основа прецизионных КР диапазона 4–16 МГц. От формирования сферической поверхности в значительной степени зависят как экономика, так и качество. Нанесение сферы было автоматизировано, обеспечена производительность около 1000 шт./чел.-смена;
- финишная обработка поверхности: ее роль для обеспечения долговременной стабильности частоты очень



высока. Тщательно обрабатывались процессы как полировки, так и травления;

- дефекты в исходных кварцевых кристаллах, в частности каналы травления: их обычное количество в хорошем (!) кварце примерно 50–100/см². Такие дефекты заметно ухудшают качество прецизионных КР, особенно высокочастотных. Разработанная в АО "Морион" технология "электроочистки" воздействием электрического поля высокой напряженности (примерно 1,5 кВ/см), совмещенным с температурой более 500°С, позволила в 50 раз уменьшить плотность каналов травления, т.е. до 0–2/см²;
- финишное производство: здесь основное внимание было уделено технологиям очистки поверхностей, нанесения электродов, монтажа, точной настройки частоты, герметизации и, конечно, созданию должной производственной среды.

Все указанные этапы становятся критически важными при требованиях к суточной нестабильности частоты примерно 10⁻¹⁰–10⁻¹¹.

Некоторые характеристики серийных прецизионных кварцевых резонаторов:

- 5-МГц КР: выпускаются в круглых корпусах НС37 и НС40. Суточная стабильность частоты 1·10⁻¹⁰...3·10⁻¹¹, годовая 2·10⁻⁸...5·10⁻⁹, за 10 лет 1·10⁻⁷...3·10⁻⁸. Кварцевые генераторы на таких КР сегодня относятся к классу ультрапрецизионных и в целом ряде применений, в частности в базовых станциях сетей CDMA и WiMax, уже заменили гораздо более дорогие и менее надежные рубидиевые генераторы;
- 10-МГц, 12,8-МГц, 13-МГц КР: выпускаются в круглых корпусах НС37 и в плоских – НС43. Суточная стабильность частоты (1...3)·10⁻¹⁰, годовая (2...5)·10⁻⁸, за 10 лет – примерно 2·10⁻⁷;
- 48-МГц, 56-МГц, 80-МГц, 98,304-МГц, 100-МГц КР – это высокочастотные прецизионные резонаторы, выпускаются в миниатюрных круглых корпусах НС35 и плоских – НС45. Их долговременная стабильность (2...3)·10⁻⁷/год и (1...1,5)·10⁻⁶ за срок службы. Устойчивое обеспечение высоких технических характеристик здесь требует повышенных усилий из-за их критичности к конструкторско-технологическим факторам.

В производстве прецизионных резонаторов очень важен подбор и обучение персонала. Построение резонаторного производства в виде независимых производственных линий

Я.Л.Вороховский

генеральный директор АО "Морион" (Санкт-Петербург), доктор технических наук, лауреат Государственной премии РФ



обеспечивает большую производственную мощность в сочетании с ее повышенной устойчивостью. На сегодня суммарная мощность производственных линий составляет 7–8 тыс. резонаторов в неделю, причем она зависит от номенклатуры выпускаемых резонаторов и при "неудачных" сочетаниях может падать примерно в два раза.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ И УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Генераторы наивысшей стабильности частоты (ультрапрецизионные)

К таковым сейчас относят кварцевые генераторы с эксплуатационной стабильностью частоты порядка 10⁻¹⁰. (Заметим, что по мере совершенствования приборов уровень ультрапрецизионности соответственно отодвигается.) "Двигателем" этого направления стали требования синхронизации сетей связи, в частности базовых станций стандарта CDMA. Конструкторско-технологически КГ такого уровня в основном реализуются двухступенчатым термостатированием кварцевого резонатора при точности поддержания температуры лучше 0,05°С и размещении менее критичных элементов во внешней ступени с точностью поддержания температуры порядка 1°С. Некоторые недостатки таких генераторов – увеличенные габариты и энергопотребление являются следствием их главного достоинства – высокой стабильности частоты, в том числе при резких изменениях окружающей температуры.

В последнее время в АО "Морион" созданы высокотехнологичные малогабаритные генераторы уровня 10⁻¹⁰ с одноступенчатым термостатированием резонатора, причем высота корпуса составляет всего 12,7 мм. Заметным результатом стала разработка технологии миниатюрного генератора с двухступенча-

Таблица 1. Параметры ультрапрецизионных генераторов уровня 10⁻¹⁰ в промышленном исполнении

Модель	Частота или диапазон частот, МГц	Стабильность частоты			Размер корпуса, мм
		в интервале температур	долговременная за год	кратковременная за 1 с (дев. Аллана)	
ГК89-ТС	4,096–10	±1·10 ⁻¹⁰	1·10 ⁻⁸	2·10 ⁻¹²	51×51×38
ГК180-ТС	5–16,384	±1·10 ⁻¹⁰	1·10 ⁻⁸	2·10 ⁻¹²	51×51×17 51×41×19
ГК200-ТС	5–100	±2·10 ⁻¹⁰	2·10 ⁻⁸	1·10 ⁻¹²	51×51×12,7
ГК209-ТС	10	±2·10 ⁻¹⁰	2·10 ⁻⁸	2·10 ⁻¹²	36×27×19
ГК216-ТС	5; 10	±5·10 ⁻¹¹	5·10 ⁻⁹	2·10 ⁻¹²	51×51×38

Таблица 2. Основные параметры миниатюрных прецизионных кварцевых генераторов

Модель генератора	Размеры, мм (объем, см ³)	Температурная нестабильность частоты	Напряжение питания, В	Особенности
ГК118-ТС	20×20×10 (4)	±1·10 ⁻⁸	5 или 3,3	Разработка 2005 г.
ГК199-ТС	20×20×12,7 (5)	±1·10 ⁻⁹	12 или 5	Разработка 2009 г.
ГК140-ТС	25,4×22×12,5 (7)	±5·10 ⁻⁹	12	SMD
ГК115-ТС	25,4×22×14 (8)	±5·10 ⁻⁹	5 или 3,3	SMD
ГК85-ТС	25,4×25,4×12,7 (8)	±5·10 ⁻⁹	12; 5 или 3,3	–
ГК197-ТС	36×27×10 (10)	±7,5·10 ⁻¹⁰	12 или 5	–

тым термостатированием, позволившая разместить генератор в корпусе размерами 36×27×19 мм (~19 см³).

Основные параметры ультрапрецизионных генераторов в промышленном исполнении приведены в табл.1.

Еще один тип генераторов уровня стабильности 10⁻¹⁰ (ГК211-ТС) рассмотрен ниже как прибор категории качества ВП, стойкий к особо жестким внешним воздействующим факторам.

Малощумящие и ультрамалощумящие генераторы

В последнее время ужесточились требования к спектрально-шумовым характеристикам прецизионных генераторов. Одновременно повышалась актуальность конструкторско-технологических решений, легко адаптируемых производством для широкого спектра требований. Выпускается унифицированный ряд малощумящих приборов: ГК197-ТС, ГК199-ТС, ГК200-ТС, ГК201-ТС и ГК220-ТС со следующими особенностями:

- высокая стабильность частоты в интервале рабочих температур: до 2·10⁻¹⁰ для ГК200-ТС и (5...10)·10⁻¹⁰ для других моделей;
- высокая долговременная стабильность частоты: до (2...3)·10⁻⁸ за год;
- исполнение с выходным сигналом SIN или HCMOS;
- исполнение с напряжением питания 12 или 5 В;
- возможность реализации ужесточенных требований к кратковременной нестабильности частоты (девиации Аллана) – вплоть до 7·10⁻¹³/с, а также времени установления частоты – до 1 мин;
- низкий уровень фазовых шумов, возможность выбора исполнения при заказе – от стандартного до малощумящего (опция LN), улучшенного малощумящего (ILN) и ультрамалощумящего (ULN). Реализованные уровни шумов генераторов на 10 МГц: ≤ -108 дБ/Гц для Δf = 1 Гц, ≤ -157 дБ/Гц для Δf = 100 Гц и ≤ -168 дБ/Гц для Δf = 10 кГц;
- низкий "профиль": высота корпуса до 10 мм для ГК197-ТС и ГК200-ТС; 12,7 мм – для всех моделей;
- исполнение в популярных стандартных корпусах с размерами в плане от миниатюрного 20×20 мм (ГК199-ТС) до малогабаритных 36×27 мм (ГК197-ТС), 51×41 мм (ГК201-ТС) и для наиболее высокого уровня параметров – 51×51 мм (ГК200-ТС, ГК220-ТС).

Диапазон частот малощумящих генераторов: 10–20 МГц для ГК197-ТС и ГК199-ТС, 10–40 МГц для ГК201-ТС, 10–100 МГц для

ГК200-ТС и ГК220-ТС. Многочисленные применения доказали эффективность реализованных концепций.

Миниатюрные прецизионные генераторы

Общая тенденция миниатюризации отнюдь не минула прецизионные КГ. Здесь и прецизионные генераторы, выполненные в конструкциях SMD-типа, – их востребованность быстро растет.

К миниатюрным прецизионным генераторам, представленным ниже, отнесены те, которые удовлетворяют следующим критериям: температурной стабильности частоты не хуже 1·10⁻⁸ и объему ≤ 10 см³ при высоте ≤ 12,7 мм (для SMD-корпуса – до 14 мм).

Серийно выпускаемый ряд генераторов на 10–13 МГц имеет уровень стабильности частоты до 5·10⁻¹⁰ (табл.2).

Из таблицы видно, что больший объем дает возможность реализовать лучшую стабильность частоты.

Высокочастотные прецизионные генераторы

В АО "Морион" разработано семейство высокочастотных генераторов на диапазон 48–500 МГц, где частоты 48–128 МГц реализованы на частоте колебания резонатора, а более высокие получены умножением частоты в составе генератора.

В построении ВЧ-генераторов выделилось два направления:

- "однорезонаторные", когда и стабильность частоты, и частота выходного сигнала определяются одним и тем же резонатором;
- "двухрезонаторные", когда в конструкции имеются опорный генератор на "своем" резонаторе частотой, как правило, примерно 5 или 10 МГц, и выходной высокочастотный генератор, управляемый напряжением (ГУН), на резонаторе, который и определяет выходную частоту. Стабильность частоты определяется опорным генератором, который управляет выходным ГУН через систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), при этом оба генератора – и опорный, и ГУН – термостатированы. Термостатирование ГУН дает серьезные преимущества благодаря управлению его частотой лишь в узких пределах, практически определяемых его долговременной нестабильностью.

"Однорезонаторные" ВЧ-генераторы проще и дешевле, чем "двухрезонаторные". Однако вторые имеют на порядок более высокую стабильность частоты. Что касается уровня фазовых шумов, то:



- в самой ближней зоне (при отстройке 10 Гц) – явное преимущество (~10 дБ/Гц) за "двухрезонаторными" генераторами;
- несколько дальше (при отстройке 100 Гц) – наоборот, "однорезонаторные" генераторы имеют меньший уровень шумов (на 10 дБ/Гц);
- начиная с отстройки 1 кГц и далее – обе концепции близки. Высокочастотные КГ серийно выпускаются на ряд стандартных частот: 48; 56; 60; 80; 98,304; 100 МГц. В вариантах с умножением частоты – на кратные этим частоты до 500 МГц.
Реализованные параметры ВЧ-генераторов:
- температурная нестабильность частоты: $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ для "однорезонаторной" концепции и $(3 \dots 5) \cdot 10^{-9}$ для "двухрезонаторной";
- нестабильность частоты за год: $(2 \dots 5) \cdot 10^{-7}$ и $(3 \dots 5) \cdot 10^{-8}$ соответственно;
- уровень фазовых шумов (для 100 МГц): $\Delta f = 100$ Гц: -120...-130 дБ/Гц для "однорезонаторных" и -115...-120 дБ/Гц для "двухрезонаторных"; $\Delta f = 10\ 000$ Гц: -160...-167 дБ/Гц для обоих видов;
- габариты:
 - "однорезонаторные" генераторы выполняются в различных корпусах – от $51 \times 51 \times 12,7$ мм (ГК87-ТС) до $36 \times 27 \times 16$ мм (ГК136-ТС) и миниатюрного $25 \times 25 \times 10$ мм (ГК218-ТС – последняя разработка, 2009 г.);
 - "двухрезонаторный" генератор (ГК137-ТС) отработан на частоты 98,304 МГц и 100 МГц и выпускается в стандартном корпусе $51 \times 51 \times 16$ мм.

Генераторы, стойкие к особо жестким внешним воздействующим факторам

Речь в основном пойдет об унифицированных генераторах категории качества ВП, введенных в издаваемый МО РФ "Перечень электрорадиоизделий, разрешенных к применению..." МОР 44 001.10 или намеченных к введению в ближайшее время. За период 2005–2009 годы в данном направлении (в области генераторов, стойких к жестким ВВФ) достигнуты следующие результаты.

- В связи с развитием бортовых стандартов частоты для КА "ГЛОНАСС-М" и далее "ГЛОНАСС-К", других видов наземной и космической аппаратуры координатно-временного обеспечения, разработаны и освоены два новых прецизионных генератора на резонаторах-термостабах SC-срезы (ГК149-ТС и ГК54М-ТС). Были значительно улучшены основные параметры:
 - кратковременная нестабильность частоты (девиация Аллана) за 1 с лучше $1 \cdot 10^{-12}$;
 - температурная нестабильность частоты в интервале рабочих температур до $5 \cdot 10^{-9}$;
 - долговременная нестабильность $2 \cdot 10^{-10}$ /сут. и $2 \cdot 10^{-7}$ за 15 лет при 120 000 ч наработки (в обеспечении КА с САС ≥ 12 лет);

- время установления частоты после включения до 3 мин.

При этом генераторы стойки к воздействию тяжелых вибраций в диапазоне до 2500 Гц с ускорением 15 g и ударами 300 g, а их энергопотребление всего 500 мВт.

- Интенсивно проводились работы по созданию стойких к жестким ВВФ ультрапрецизионных КГ. Генератор ГК211-ТС ("Пикник"), выполненный на стандартные частоты 5 и 10 МГц, обеспечивает:
 - температурную стабильность частоты до $5 \cdot 10^{-11} \dots 1 \cdot 10^{-10}$;
 - долговременную стабильность частоты до $5 \cdot 10^{-11}$ /сут. и $5 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ /год;
 - кратковременную нестабильность частоты за 1...10 с до $2 \cdot 10^{-12}$;
 - стойкость к вибрациям до 2500 Гц с ускорением 15 g и ударами 300 g.

Размеры генератора $62 \times 62 \times 40$ мм. Уменьшение габаритов было невозможно из-за очень ограниченных возможностей отечественной элементной базы категории качества ВП.

- Развитие направления высокочастотных прецизионных малошумящих генераторов стимулируется проектами перспективных наземных и бортовых РЛС, хотя надо сказать, что они стали актуальны и для других видов РЭА. Основные результаты работ сведены в табл.3. Назначение и области применения КГ обусловили особенности конструктивно-технологического исполнения:
 - отсутствие собственных резонансных частот конструкций в диапазоне до 2 кГц, что уже позволило существенно снизить уровень фазовых шумов при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ) и обеспечить прочность к длительному воздействию вибраций до 2000 кГц, 10–15g;
 - ГК148-ТС и ГК213-ТС отработаны на частоты 48, 56, 60, 80 и 100 МГц;

Таблица 3. Высокочастотные прецизионные малошумящие генераторы, стойкие к жестким ВВФ

Основные характеристики	Модель ВЧ-генератора		
	ГК148-ТС	ГК212-ТС	ГК213-ТС
Частота или диапазон частот, МГц	48–100	100	48–100
Стабильность частоты: в интервале -55...70°C долговременная за год	$5 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$ $3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$ $3 \cdot 10^{-7}$
Фазовые шумы при отстройках: 100 Гц, дБ/Гц 100 кГц, дБ/Гц	-130 -165	-115 -165	-135* -165
Размеры корпуса, мм	$51 \times 51 \times 25$	$90 \times 60 \times 50$	$130 \times 110 \times 90$
Особенности конструктивно-технологического исполнения	Однорезонаторный	Двухрезонаторный, с ФАПЧ	Вибро-акустостойчивый, с резко пониженной g-чувствительностью

* В том числе при воздействии ШСВ до 2000 Гц, 3,3 g.

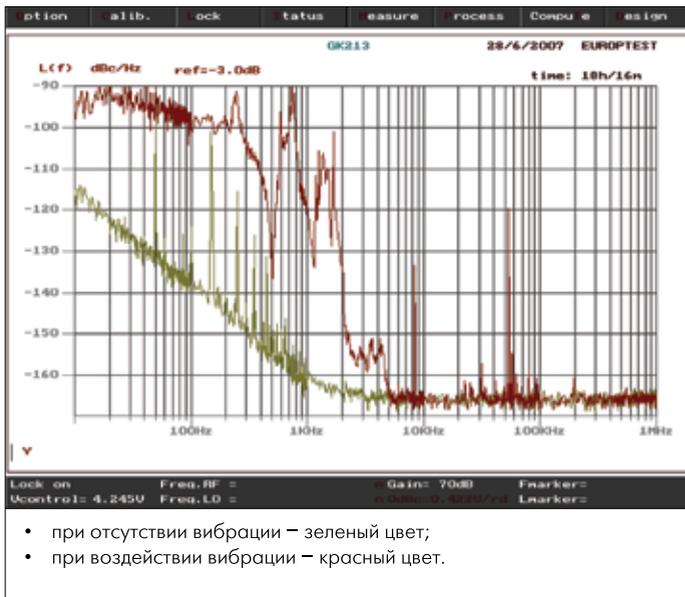


Рис. 1. Шумы генератора GK148-ТС

- GK212-ТС стал первым двухрезонаторным (с ФАПЧ) ВЧ-генератором, стойким к таким жестким воздействиям, как вибрации до 2000 Гц, 15g, при стабильности $\sim 10^{-10}$ и уровне шумов -165 дБ/Гц;
- при работе над GK213-ТС встала задача создания КГ с резко пониженной g-чувствительностью, у которого, как бы вопреки природе кварцевого резонатора, практически отсутствует ухудшение фазовых шумов при воздействии мощной ШСВ. Для жесткой конструкции GK148-ТС деградация, т.е. ухудшение шумов, тем не менее составляет ~ 10 дБ/Гц на 1g среднеквадратичного ускорения ШСВ, т.е. ~ 30 дБ/Гц для 3,3g (рис.1). В виброакустоустойчивой ("бездеградационной") конструкции GK213-ТС задача решена (рис.2). При практически устраненной деградации фазовых шумов цель – получить уровень

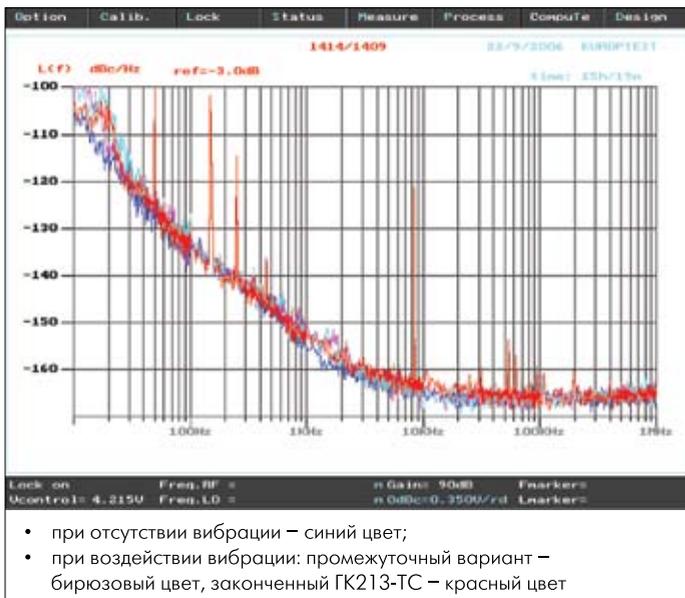


Рис.2. Шумы вибро- акустоустойчивого генератора GK213-ТС

шумов не хуже -135 дБ/Гц при отстройке 100 Гц, в процессе воздействия ШСВ 3,3 g до 2000 Гц – достигнута.

Ясно, что одним из основных направлений дальнейших работ по прецизионным генераторам, стойким к жестким ВВФ, должна быть миниатюризация. И здесь главный вопрос – возможности отечественной ЭКБ, о чем будет речь далее.

ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С МИНИМАЛЬНЫМИ ВРЕМЕНЕМ ГОТОВНОСТИ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Вполне реальны ситуации, когда КГ, наряду с высокой стабильностью частоты, должны иметь минимальные энергопотребление (<100 мВт) и время стабилизации частоты после включения (единицы секунд). По сути, речь идет о прецизионных термокомпенсированных КГ со стабильностью частоты на уровне термостатированных.

Резонаторы для таких КГ должны иметь высокую долговременную стабильность частоты, минимальное изменение частоты по температурно-частотной характеристике (ТЧХ) и монотонную ("гладкую") ТЧХ без аномалий во всем интервале рабочих температур. Их разработка потребовала серьезных усилий и использования основных технологий прецизионных термостатируемых резонаторов. В итоге разработаны специальные резонаторы на 3-м обертоне АТ-среза, выполненные в холодно-сварных корпусах HC43. Они уже отработаны на стандартные частоты 9,8304 МГц, 10,0 МГц, 12,288 МГц и 12,8 МГц.

С использованием цифровой термокомпенсации на эти частоты реализованы два вида серийных генераторов:

- GK202-ТК: напряжение питания 5 В, корпус размерами 36×27×12,7 мм;
- GK203-ТК: напряжение питания 12 В, корпус размерами 36×27×10,5 мм.

Температурная нестабильность частоты в интервале от -40 до 70°C имеет величину до $\pm 7,5 \cdot 10^{-8}$ для 10 МГц и $\pm 2,0 \cdot 10^{-7}$ для 12,8 МГц; долговременная – до $1,5 \cdot 10^{-7}$ /год. Потребляемая этими КГ мощность составляет примерно 100 мВт, причем без пика потребления после включения, а время стабилизации частоты после включения менее 3 с.

Сочетание высокой стабильности частоты, обычно присущей термостатированным генераторам, с очень малым энергопотреблением и почти мгновенной готовностью к работе делает рассматриваемые термокомпенсированные генераторы эффективным решением для многих применений, в частности, – в носимой и мобильной радиосвязи.

В заключение можно констатировать, что в области прецизионных кварцевых генераторов со стабильностью частоты $10^{-9} \dots 10^{-11}$ АО "Морион" уверенно входит в число крупнейших мировых производителей, лидирующих по техническому уровню, и проблема так называемого "импортозамещения" этих изделий отсутствует.