

Высокостабильные малозащумящие кварцевые генераторы

Яков ВОРОХОВСКИЙ,
лауреат Государственной премии РФ,
к.т.н.
yakov@morion.com.ru
Владимир ИЛЬИЧЕВ,
к.т.н.
vilich@morion.com.ru

Острая конкуренция на открытом мировом и внутреннем рынках в условиях нарастающей глобализации стимулирует постоянное совершенствование изделий промышленности. Этому способствует радикальное облегчение доступа к использованию передовых технологий и элементной базы, включая зарубежные, что особенно существенно для предприятий, выпускающих наукоемкую продукцию.

Коренным образом улучшились условия получения научно-технической и справочной информации, при этом особенно важна ее достоверность и полнота. Однако в некоторых случаях широкий охват зарубежных информационных материалов сочетается с поразительным невниманием к продукции отечественных производителей. Например, российский автор Л. Белов в обзоре «Опорные генераторы», опубликованном в российском журнале «Электроника: НТБ» (2004 г., № 6, с. 38–44), не сообщает ничего об опорных кварцевых генераторах (КГ) российского производства. Аналогичная ситуация наблюдается и в обзоре «Российский рынок компонентов беспроводной связи», напечатанном в журнале «Современная электроника» (2005 г., № 1, с. 8–9), хотя отечественные КГ не только широко применяются в России, но и признаны и приняты к использованию за рубежом.

Достигнутый уровень параметров российских прецизионных и ультрапрецизионных КГ, объемы их производства и стоимость таковы, что они практически полностью удовлетворяют потребности внутреннего рынка РФ и вполне конкурентоспособны на мировом рынке. В профессиональных кругах, решаю-

щих задачи связи и частотно-временного обеспечения, достаточно хорошо известна продукция АО «МОРИОН», сведения о его опорных КГ на 2002–2003 гг. имеются в [1, 2, 3]. В настоящей статье, наряду со справочными данными о выпускаемых АО «МОРИОН» опорных КГ, рассмотрены новые результаты, полученные в этой области в 2004 — начале 2005 года [4]. Принципиальные особенности нашего развития, то есть «как мы дошли до жизни такой» после образования АО, рассмотрены в [5].

Для того чтобы заинтересованным читателям было проще сориентироваться, в таблице 1 дан «путеводитель» по статье, в котором указаны основные характерные параметры представленных в статье видов генераторов. Внимание (!): номера у видов конструктивно-технологических исполнений генераторов в таблице 1 соответствуют номерам разделов и подразделов статьи, где эти приборы описаны.

1. Прецизионные термостатированные генераторы

Конкурентоспособность рассматриваемых термостатированных КГ обеспечена высоким

уровнем всех параметров (характеризующих стабильность частоты) при небольших габаритных размерах, энергопотреблении, высокой надежности в жестких условиях эксплуатации и умеренной стоимости. Так, по температурной стабильности частоты достигнут уровень $\pm 1 \times 10^{-10}$ в интервале температур $-40-70$ °С, по долговременной стабильности: 1×10^{-8} за год и 5×10^{-8} за 10 лет, по кратковременной нестабильности частоты (КНЧ): 1×10^{-12} за 1с, по уровню фазовых шумов (ФШ): -115 дБ/Гц и -160 дБ/Гц при отстройках от несущей 1 Гц и 10 кГц соответственно.

Термостатированные КГ изготавливаются как на основе резонаторов с внутренним термостатированием, или резонаторов-термостатов (РТ) [1], так и на основе КР в вакуумных металлических корпусах с внешним термостатированием.

1.1. Генераторы на основе РТ были первыми прецизионными КГ, освоенными в производстве на заводе «МОРИОН». Благодаря высоким теплоизолирующим свойствам вакуума и хорошей тепловой связи нагревателя с пьезоэлементом, применение РТ и сейчас позволяет проектировать и выпускать наиболее экономичные по энергопотреблению термостатированные КГ с самым быстрым

Таблица 1. Основные параметры высокостабильных кварцевых генераторов АО «МОРИОН»

Параметры	1. Прецизионные термостатированные					2. Термокомпенсированные
	1.1. На основе резонаторов с внутренним термостатированием (РТ)	1.2. С внешним термостатированием резонатора				
		1.2.1. Малогабаритные и миниатюрные	1.2.2, 1.2.3. Ультрапрецизионные		1.2.4. Высокочастотные	
			1.2.2. С одноступенчатым термостатированием	1.2.3. С двухступенчатым термостатированием		
Эксплуатационная стабильность частоты (порядок)	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	$10^{-7}10^{-9}$	10^{-6}
Кратковременная нестабильность частоты за 1 с	$(1...5) \times 10^{-12}$	10^{-11}	5×10^{-12}	$(1...2) \times 10^{-12}$	—	10^{-10}
Диапазон частот, МГц	4,4–20	4,0–40	4,0–40	4,0–16,384	50–700	9,6–20
Энергопотребление, Вт	0,3	1–2	2,5–3	3,5–4	1,5–3,5	0,02–0,1
Время выхода на режим, мин	1–3	3	5–8	10–15	5–10	0,01
Габаритные размеры, мм	$51 \times (41...51) \times (17...25)$	$20 \times 20 \times 10$ $25 \times 25 \times 12,7$ $36 \times 27 \times 16$	$36 \times 27 \times 15$ $1 \times (41...51) \times (13...25)$	$36 \times 27 \times 19$ $51 \times 51 \times (25...38)$	$36 \times 27 \times 16$ $51 \times 51 \times (12,7...25)$	$21 \times 13 \times 9,5$ $36 \times 27 \times 10$

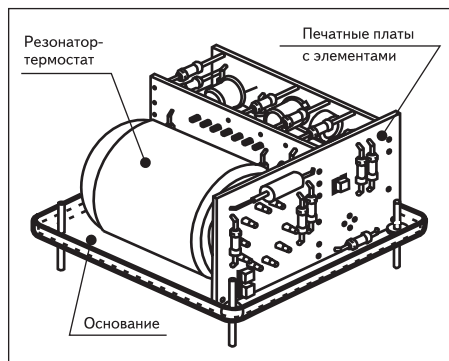


Рис. 1. Общий вид внутреннего устройства генераторов на основе РТ

выходом на рабочий режим после включения. Кроме того, генераторам на основе РТ присущи:

- высокая стабильность частоты: температурная нестабильность до $\pm 1 \times 10^{-8}$ в интервале $-20...+70^\circ\text{C}$, долговременная — до $\pm 2 \times 10^{-7}$ за 10 лет;
- низкий уровень ФШ;
- малые значения КНЧ;
- высокая надежность в условиях жестких внешних воздействующих факторов (ВВФ).

В последние несколько лет КГ на РТ были в основном переведены на SC-срез кварца, и таким образом существенно улучшены.

В настоящее время на основе РТ производятся следующие прецизионные генераторы: ГК54-ТС и ГК75-ТС — на РТ с позисторным нагревателем;

ГК68-ТС и ГК80-ТС — на РТ с комбинированным транзисторно-пленочным нагревателем, применение которого совместно с серьезными мерами по улучшению конструкции термостатируемого узла [6] позволило сократить время установления частоты генератора с точностью в 1×10^{-7} до 30–60 с.

Еще одна особенность генераторов с РТ, имеющими комбинированный нагреватель, — очень малое энергопотребление не только в установившемся, но и в переходном режиме после включения. Новыми в этом виде являются «низкопрофильные» генераторы ГК93-ТС и ГК143-ТС, предназначенные для применения в условиях жестких ВВФ. Высота корпуса таких генераторов 17 мм, в них используются новейшие РТ с диаметром баллона 13 мм.

Общий вид конструкции генераторов на РТ показан на рис. 1, типовой спектр ФШ представлен на рис. 2, а типовая зависимость кратковременной нестабильности частоты от времени усреднения — на рис. 3.

Основные параметры генераторов на основе РТ приведены в таблице 2.

1.2. Генераторы с внешним термостатированием резонатора уступают генераторам на основе РТ по экономичности энергопотребления и скорости выхода на рабочий режим после включения. Однако при этом возможно достижение существенно лучшей тем-

Таблица 2. Основные параметры генераторов на основе РТ

Параметры	ГК54-ТС ГК75-ТС	ГК68-ТС	ГК80-ТС	ГК93-ТС	ГК143-ТС
Стандартные частоты, МГц	4,9152; 5,0; 6,4; 8,192; 9,8304; 10,0; 12,8; 16,384; 20,0	9,6 10,0	10,0 10,1507	9,166208 10,0	9,0–13,0
Габаритные размеры корпуса, мм	51×51×25	51×41×25	51×41×25	51×41×17	51×41×17
Температурная нестабильность частоты в интервалах: –10...+60 (+70) °С –40...+70 °С –60...+70 °С	$\pm 5 \times 10^{-9}$ $\pm 1,5 \times 10^{-8}$ $\pm 2,5 \times 10^{-8}$	$\pm 1 \times 10^{-9}$ $\pm 2 \times 10^{-9}$ $\pm 3 \times 10^{-9}$	$\pm 1 \times 10^{-8}$ $\pm 2 \times 10^{-8}$ –	$\pm 5 \times 10^{-9}(-30...+50)$ $\pm 2 \times 10^{-7}(-55...+60)$	– – $\pm 5 \times 10^{-8}$
Долговременная нестабильность частоты: за год, $\times 10^{-8}$ за 10 лет, $\times 10^{-7}$	$\pm(3...5)$ ± 2	± 20 ± 5	± 20 ± 5	± 20 ± 5	± 20 ± 5
Кратковременная нестабильность за 1 с (девиация Аллана)	1×10^{-12} 2×10^{-12} $(0,5-2) \times 10^{-11}$	5×10^{-11}	3×10^{-11}	1×10^{-10}	2×10^{-11}
Фазовый шум, дБ/Гц, (для 10 МГц): при $\Delta f = 1$ Гц при $\Delta f = 10\,000$ Гц	–105 (10МГц) –115 (5МГц) –160	–80 –157	–90 –155	–70 –150	($\Delta f = 10$ Гц) –120 –155
Напряжение питания, В	12	12	5 12	12	12
Потребляемый ток, мА: в установившемся режиме пиковый, при разогреве	40 400	40 120	40 250 35 150	40 140	40 100
Время установления частоты с точностью 1×10^{-7} , мин	3; 5	1	1	1 ($\pm 5 \times 10^{-7}$)	1 ($\pm 5 \times 10^{-7}$) 3 ($\pm 1 \times 10^{-7}$)
Вибростойкость: диапазон частот, Гц ускорение, g	1–2000 10	1–2000 8	10–200 8	1–2000 10	1–2000 10
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	150	100	100	300	150

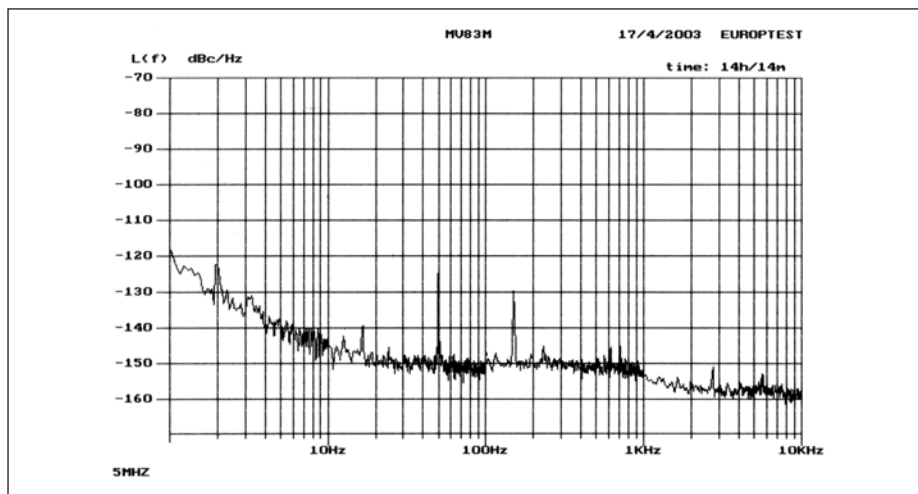


Рис. 2. Типовой спектр фазовых шумов 5-МГц генератора на основе РТ SC-среза

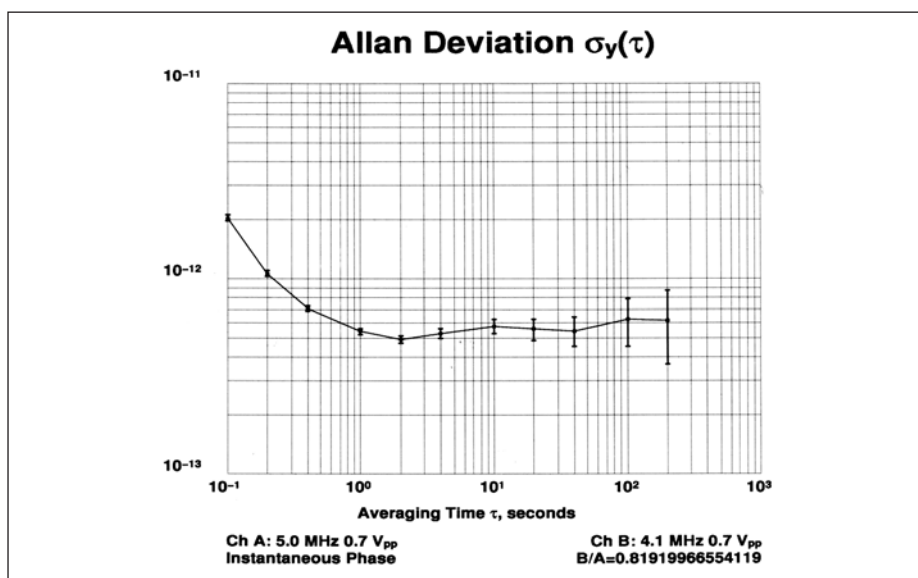


Рис. 3. Типовая зависимость кратковременной нестабильности частоты от времени усреднения для 5-МГц генератора на основе РТ SC-среза

пературной стабильности частоты и меньших габаритных размеров КГ, которые к тому же могут быть более технологичными и менее трудоемкими в производстве. Возможность улучшения температурной стабильности частоты в значительной мере связана со снижением температурных градиентов в термостатируемом узле и самом пьезоэлементе, что легче достигается у резонаторов с металлическими корпусами, выполняющими функцию первичного теплового шунта. У РТ возможность уменьшения градиентов затруднена сущностью их конструкции, а также противоречит стойкости к жестким механическим воздействиям.

1.2.1. Малогабаритные и миниатюрные прецизионные КГ

Генераторы этой группы выполняются на резонаторах в корпусах НС-43, преимущественно SC-среза, реже — АТ-среза. Несколько уступая генераторам на основе РТ по стабильности частоты и спектральным характеристикам, значительно уступая им по экономичности энергопотребления, они, однако, гораздо дешевле и имеют значительно меньшие габаритные размеры.

Габаритные размеры генераторов ГК85-ТС и ГК118-ТС — 25×25×12,7 мм и 20×20×10 мм соответственно. Генератор ГК118-ТС является нашим самым миниатюрным из высокостабильных термостатированных КГ.

Генератор ГК95-ТС, разработанный для использования в специальной аппаратуре, имеет, как и ГК85-ТС, габаритные размеры 25×25×12,7 мм, обладает высокой стойкостью к механическим воздействиям.

Генератор ГК103-ТС на диапазон частот 10–40 МГц выполнен в стандартном «европейском» корпусе с габаритными размерами 36×27×16 мм.

Существенным является появление термостатированных генераторов, предназначенных для использования по SMD-технологии, то есть для поверхностного монтажа.

Генератор ГК115-ТС-SMD — первый из семейства предназначенных для поверхностного монтажа, имеет размеры 25×22×14 мм, его внешний вид представлен на рис. 4. Важной особенностью для применения в современной аппаратуре является также наличие у него вариантов исполнения с напряжениями пи-

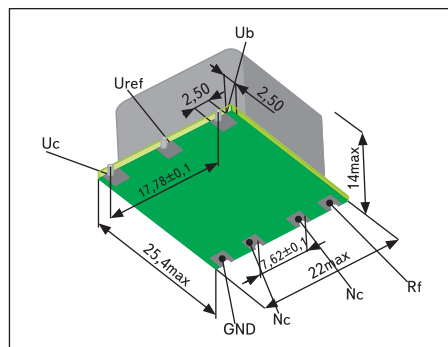


Рис. 4. Внешний вид SMD-термостатированных генераторов ГК115-ТС-SMD и ГК140-ТС-SMD

Таблица 3. Основные параметры малогабаритных и миниатюрных прецизионных генераторов

Параметры	ГК85-ТС	ГК118-ТС	ГК95-ТС	ГК103-ТС	ГК115-ТС-SMD	ГК140-ТС-SMD
Диапазон частот, МГц	10...25	10...25	—	10...40	10...40	—
Стандартные частоты, МГц	10,0; 12,8; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0	10,0; 12,8; 13,0; 16,0; 20,0; 25,0	10,0; 19,683	10; 12; 12,8; 13; 15,36; 16; 16,384; 20; 26; 30,72; 32; 32,768	10; 12,8; 16,384; 20; 26; 32,768; 40	10,0
Габаритные размеры корпуса, мм	25×25×12,7	20×20×10	25×25×12,7	36×27×16	25×22×15	25×22×14
Температурная нестабильность частоты в интервалах: –10...+60 (+70) °С –40...+70 °С –60...+70 °С	±1×10 ⁻⁸ ±3×10 ⁻⁸ —	±1×10 ⁻⁸ ±2×10 ⁻⁸ —	±1×10 ⁻⁸ ±2×10 ⁻⁸ ±5×10 ⁻⁸	±5×10 ⁻⁹ ±2×10 ⁻⁸ —	±1×10 ⁻⁸ ±2×10 ⁻⁸ —	–20...+70 °С; ±5×10 ⁻⁹ — —
Долговременная нестабильность частоты: за год, ×10 ⁻⁷ за 10 лет, ×10 ⁻⁷	±(0,5...1) ±5	±(0,5...1) ±5	±1 ±5	±(0,5...1) ±5	±(0,5...1) ±5	±(0,5...1) ±5
Кратковременная нестабильность за 1 с (девиация Аллана)	5×10 ⁻¹¹	5×10 ⁻¹¹	3×10 ⁻⁹ (1...50) мс	2×10 ⁻¹¹	2×10 ⁻¹¹	5×10 ⁻¹²
Фазовый шум, дБ/Гц, (для 10 МГц): при Δf = 1 Гц при Δf = 10 000 Гц	–85 –155	–85 –150	–90 –150	–90 –150	–90 –145	–90 –150
Напряжение питания, В	5 12	3,3 5	12	5 12	3,3 5	12
Потребляемый ток, мА: в установившемся режиме пиковый, при разогреве	200 600	80 300	250 700	150 500	200 600	80 300
Время установления частоты с точностью 1×10 ⁻⁷ , мин	3	3	3 с точностью 1×10 ⁻⁸	3	3	3
Выборочность: диапазон частот, Гц ускорение, g	1–500 10	1–500 10	1–2000 15	1–500 10	1–500 10	1–500 10
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	100	100	100	100	100	100

тания 3,3 и 5 В. Успешно завершена разработка и освоено производство SMD-генератора ГК140-ТС с существенно более высокой стабильностью частоты ±5×10⁻⁹ (–20...+70 °С) и теми же габаритными размерами. Энергопотребление SMD-термостатированных генераторов в целом несколько выше, чем у других генераторов этой группы, из-за худших условий теплоизоляции от внешней среды.

Благодаря высокой стабильности частоты, неплохим КНЧ и ФШ при весьма малых габаритах и умеренном энергопотреблении генераторы этой группы широко применяются в самых различных областях. Их основные параметры приведены в таблице 3.

1.2.2. Ультрапрецизионные КГ (класса 10⁻⁹) с одноступенчатым термостатированием

Генератор ГК62-ТС построен на резонаторе SC-среза в корпусе НС-37, конструкция оптимизирована по тепловым потокам. С целью повышения точности поддержания температуры система термостатирования дополнена органами коррекции, реагирующими на изменения окружающей температуры, воспринимаемые отдельным датчиком. Достигнута температурная нестабильность частоты ±1×10⁻⁹ в интервале температур –40...+70 °С, прочие показатели стабильности соответствуют уровню генераторов с РТ,

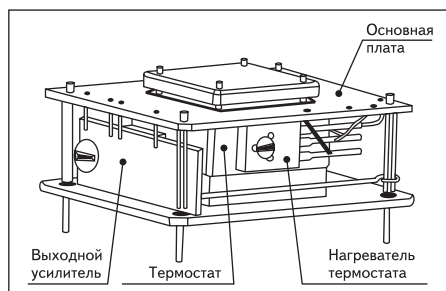


Рис. 5. Общий вид конструкции генератора ГК62-ТС

при достаточно малых габаритных размерах 51×41×19 мм. Общий вид конструкции генератора показан на рис. 5.

Генератор ГК90-ТС, обладая показателями стабильности, близкими к генератору ГК62-ТС, отличается от него уменьшенной до 12,7 мм высотой, что достигнуто за счет «плоского» резонатора в корпусе НС-43 и заметно расширяет возможности его применения в аппаратуре с жестким ограничением компонентов по высоте. Общий вид конструкции показан на рис. 6, типовые характеристики — на рис. 7–9.

В 2004–2005 гг. в производство передано высокоэффективное «семейство» унифицированных генераторов этого класса — ГК102-ТС и ГК172-ТС — с исполнениями, охватывающими самый широкий круг запросов разработчиков аппаратуры.

В мае 2005 года закончена разработка миниатюрного (36,1×27,2×15 мм) ультрапрецизионного генератора ГК178-ТС, совсем немного уступающего по температурной и долговременной стабильности генераторам данного класса, имеющим в 2–3 раза больший объем. Этот генератор по питанию предназначен для работы от присущих современной аппаратуре источников 3,3 В и 5 В.

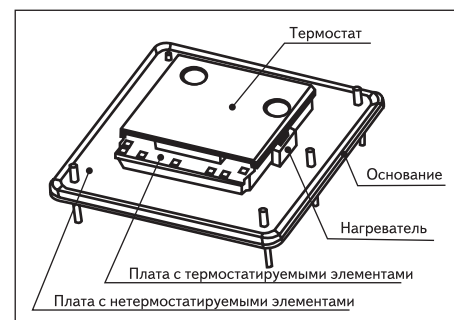


Рис. 6. Общий вид конструкции генератора ГК90-ТС

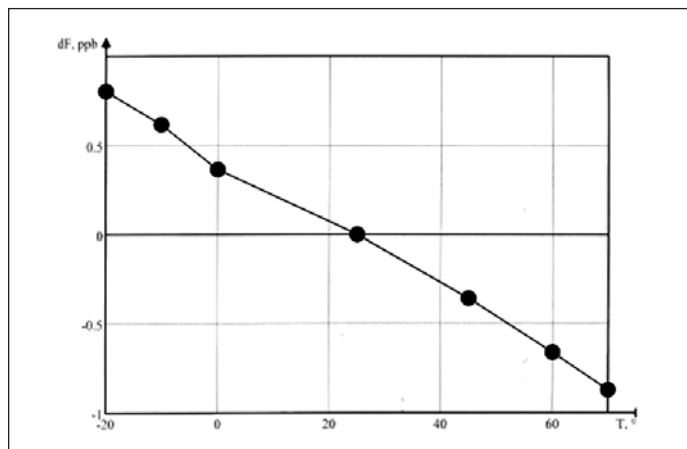


Рис. 7. Типовая температурно-частотная характеристика генератора ГК90-ТС

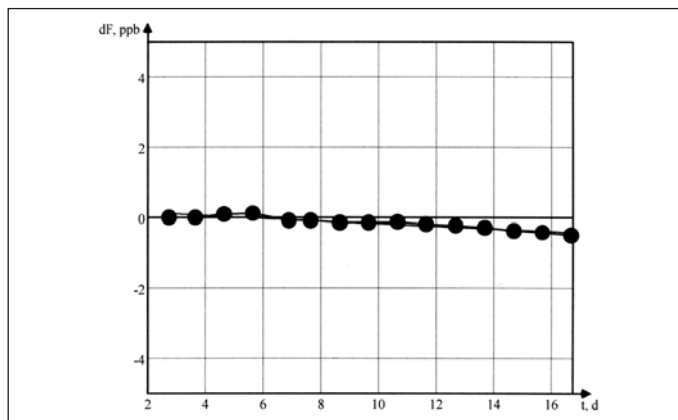


Рис. 8. Типовая характеристика долговременной стабильности генератора ГК90-ТС («старение» за 17 суток)

Основные параметры ультрапрецизионных КГ с одноступенчатым термостатированием приведены в таблице 4.

1.2.3. Ультрапрецизионные КГ (класса 10⁻¹⁰) с двухступенчатым термостатированием

Генератор ГК89-ТС — первый отечественный ультрапрецизионный КГ с двухступенчатым термостатированием класса 10⁻¹⁰ по стабильности. Он выполнен на резонаторе SC-среза в корпусе HC-40. По температурной стабильности частоты на порядок и более превосходит кварцевые генераторы с одноступенчатым термостатированием, превосходит даже и рубидиевые генераторы, будучи к тому же намного лучше последних по спектральным характеристикам ФШ, по КНЧ и массогабаритным показателям и имея гораздо более низкую стоимость. Общий вид конструкции КГ представлен на рис. 10, типовые характеристики указаны на рис. 11–14.

Новый генератор ГК142-ТС (2004 г.) по стабильности частоты имеет характеристики, идентичные ГК89-ТС, отличаясь от него высотой, уменьшенной с 38 до 25 мм, и почти в 1,5 раза меньшим потреблением, что существенно расширяет возможности его использования в современной аппаратуре. В результате дальнейших работ, проведенных в 2005 году, появился еще более «плоский» ГК180-ТС,

Таблица 4. Основные параметры ультрапрецизионных КГ с одноступенчатым термостатированием

Параметры	ГК62-ТС	ГК90-ТС	ГК102-ТС	ГК172-ТС	ГК178-ТС
Диапазон частот, МГц	5...16,384	10...16,384	5...40	4...20	5...10
Стандартные частоты, МГц	5,0; 8,192; 10,0; 16,384	10,0; 13,0; 16,384	5,0; 8,192; 10,0; 16,384	4,096; 5,0; 8,192; 10,0; 16,384; 20	5,0; 8,192; 10,0
Габаритные размеры корпуса, мм	51×41×19 51×41×25	51×41×12,7 51×51×12,7	51×51×19 (16) 51×51×13	51×51×19 51×51×25	36×27×15
Температурная нестабильность частоты в интервалах: -10...+60 (+70) °C -40...+70 °C	±(0,5...1)×10 ⁻⁹ ±(1...2)×10 ⁻⁹	±1×10 ⁻⁹ ±2,5×10 ⁻⁹	±2×10 ⁻⁹ ±4×10 ⁻⁹	±1×10 ⁻⁹ ±2×10 ⁻⁹	±2,5×10 ⁻⁹ ±5×10 ⁻⁹
Долговременная нестабильность частоты: за год, ×10 ⁻⁸ за 10 лет, ×10 ⁻⁷	±(3...5) ±(1,5...2,5)	±5 ±3	±3 ±2	±1 ±1	±3 ±2
Кратковременная нестабильность за 1 с (девиация Аллана)	1×10 ⁻¹¹	1×10 ⁻¹¹	5×10 ⁻¹²	3×10 ⁻¹²	5×10 ⁻¹²
Фазовый шум, дБ/Гц: при Δf = 1 Гц при Δf = 10000 Гц	Для 5 МГц: -100 -155	Для 10 МГц: -90 -150	Для 8,192 МГц: -95 -155	Для 5 МГц: -100 -155	Для 10 МГц: -90 -150
Напряжение питания, В	12	12	5 12	5 12	3,3 5
Потребляемый ток, мА: в установившемся режиме пиковый, при разогреве	180 500	200 500	500 1200 200 600	500 1200 200 600	350 1200 250 800
Время установления частоты, мин	5 (в ±5×10 ⁻⁹)	5 (в ±5×10 ⁻⁹)	5 (в ±1×10 ⁻⁹)	8 (в ±1×10 ⁻⁹)	5 (в ±1×10 ⁻⁹)
Вибростойкость: диапазон частот, Гц ускорение, g	1–200 5	1–200 5	1–200 5	1–200 5	1–200 5
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	100	40	75	75	75

с высотой 19 мм (!) при той же стабильности частоты.

В 2004 — начале 2005 года разработан и передан в производство миниатюрный ультрапрецизионный генератор ГК145-ТС, имеющий размеры 36×27×19 мм лишь при несколько худших показателях температурной

и долговременной стабильности частоты (~ ±3×10⁻¹⁰ и ±3×10⁻⁸/год соответственно).

Основные параметры ультрапрецизионных генераторов с двухступенчатым термостатированием приведены в таблице 5.

Принципиально важно, что развитие беспроводных сетей мобильной связи потре-

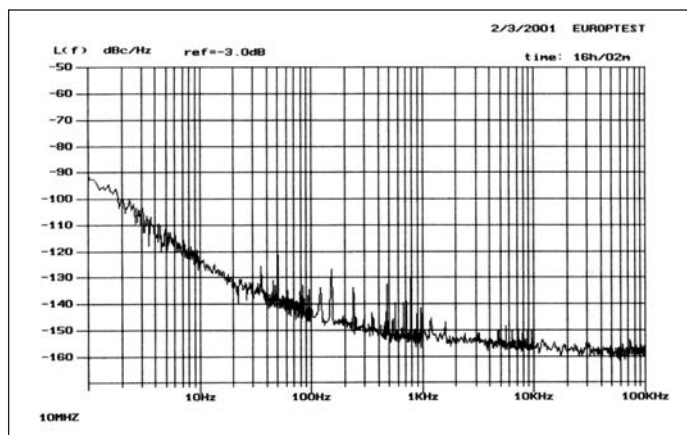


Рис. 9. Типовой спектр ФШ генератора ГК90-ТС частотой 10 МГц

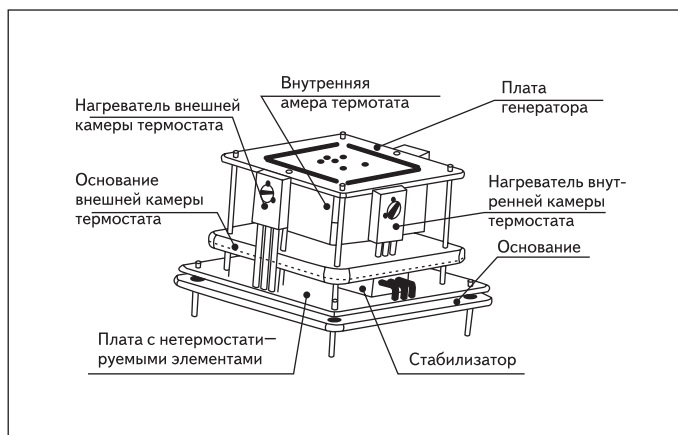


Рис. 10. Общий вид конструкции генератора ГК89-ТС

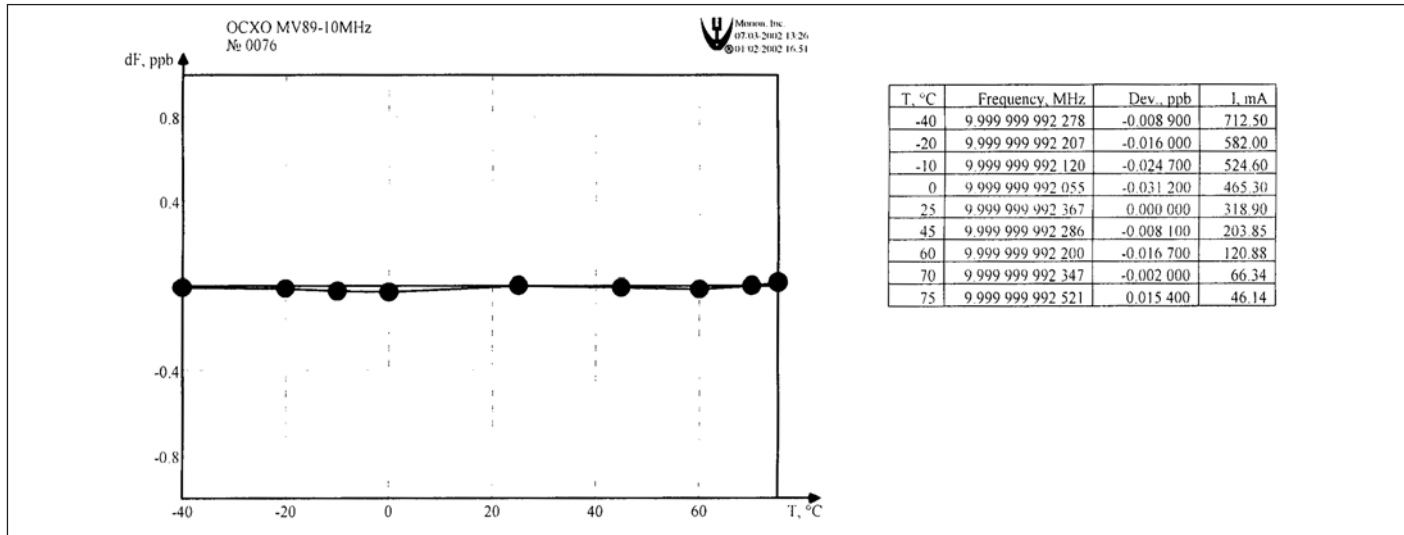


Рис. 11. Температурно-частотная характеристика генератора ГК89-ТС частотой 10 МГц

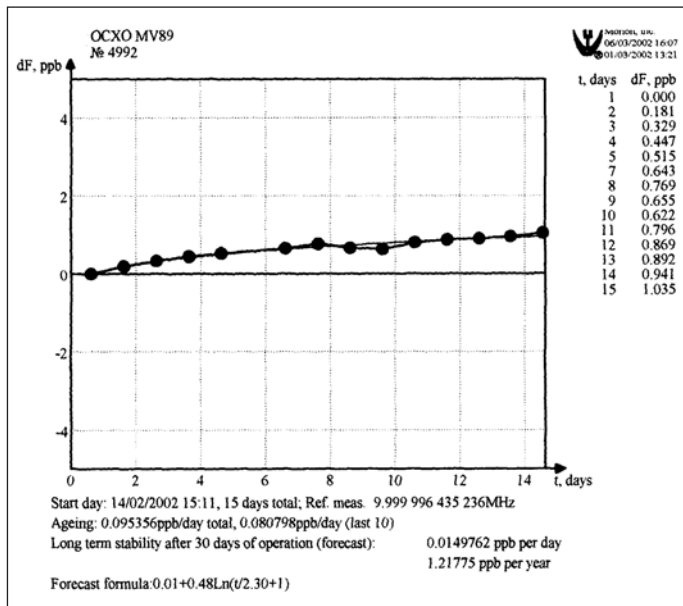


Рис. 12. Характеристика долговременной стабильности генератора ГК89-ТС

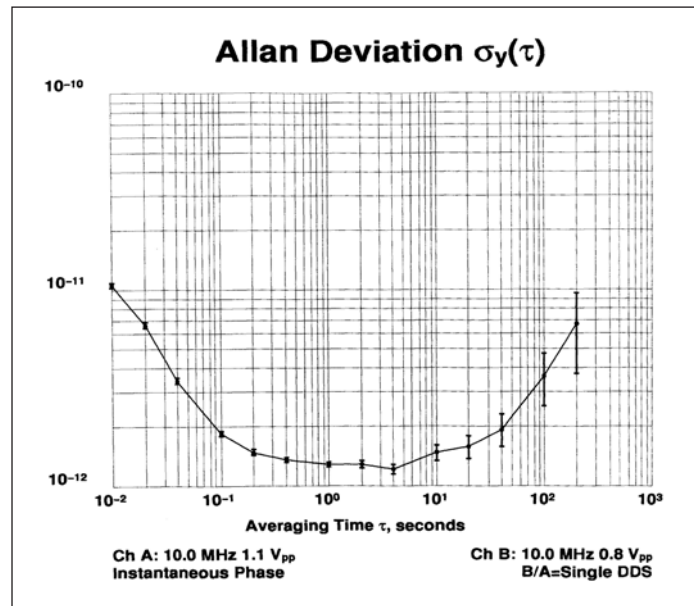


Рис. 13. Типовая зависимость КНЧ от времени усреднения для генератора ГК89-ТС

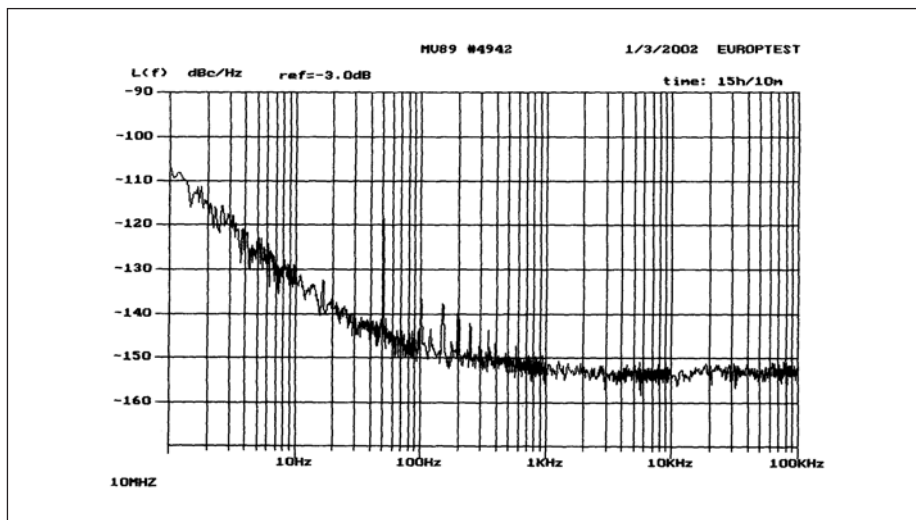


Рис. 14. Типовой спектр ФШ генератора ГК89-ТС частотой 10 МГц

бывало доведения технологии ультрапрецизионных генераторов, представленных в п. п. 1.2.2., 1.2.3. (то есть классов 10^{-9} и 10^{-10}), до требований крупносерийного производства. И эта задача АО «МОРИОН» была успешно решена. Судя по всему, данные КГ имеют все шансы стать основными для решения многих задач частотно-временного обеспечения в ближайшие годы.

1.2.4. Высоочастотные прецизионные КГ

Задача создания высокостабильных КГ с низкими уровнями ФШ и КНЧ на возможно более высокие частоты очень актуальна в связи с общей тенденцией освоения все более высоких частот в радиоэлектронике. Повышение частот путем умножения сопровождается возрастанием фазовых шумов приблизительно на 6 дБ при каждом удвоении, что нередко затрудняет применение опорных генераторов диапазона 5–20 МГц. Эффективным путем

Таблица 5. Основные параметры ультрапрецизионных генераторов с двухступенчатым

Параметры	ГК89-ТС	ГК142-ТС	ГК145-ТС	ГК180-ТС
Стандартные частоты, МГц	4,096; 5,0; 8,192; 10,0; 16,384	4,096; 5,0; 8,192; 10,0	5,0; 8,192; 10,0	5,0; 10,0
Габаритные размеры корпуса, мм	51×51×38	51×51×25	36×27×19	51×51×19
Температурная нестабильность частоты в интервалах: -10...+60 (+70) °C -40...+70 °C	$\pm(0,5...1) \times 10^{-10}$ $\pm 1,5 \times 10^{-10}$	$\pm(1...2) \times 10^{-10}$ $\pm(2...3) \times 10^{-10}$	$\pm 3 \times 10^{-10}$ $\pm 5 \times 10^{-10}$	$\pm 1 \times 10^{-10}$ $\pm 3 \times 10^{-10}$
Долговременная нестабильность частоты: за год, $\times 10^{-8}$ за 10 лет, $\times 10^{-7}$	$\pm(0,5...2)$ $\pm(0,3...1)$	$\pm(0,5...2)$ $\pm(0,3...1)$	± 3 ± 2	± 2 ± 1
Кратковременная нестабильность за 1 с (девиация Аллана)	1×10^{-12} 2×10^{-12}	$(1...3) \times 10^{-12}$	5×10^{-12}	3×10^{-12}
Фазовый шум, дБ/Гц: при $\Delta f = 1$ Гц при $\Delta f = 10\,000$ Гц	Для 5 МГц: -105 -155	Для 5 МГц: -105 -155	Для 10 МГц: -95 -150	Для 10 МГц: -95 -150
Напряжение питания, В	12	12	12	12
Потребляемый ток, мА: в установившемся режиме пиковый, при разогреве	350 1500	250 1000	180 700	250 500
Время установления частоты, мин, с точностью $\pm 1 \times 10^{-8}$	15	15	10	10
Вибростойкость: диапазон частот, Гц ускорение, g	1-500 5	1-500 5	1-500 10	1-500 5
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	75	75	150	150

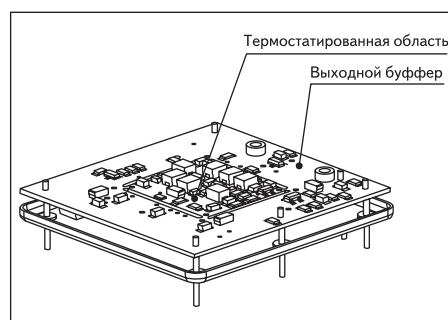


Рис. 15. Общий вид конструкции генератора ГК87-ТС

получения высокой и притом стабильной кварцеванной частоты является разработка малошумящих высокочастотных генераторов на основе резонаторов SC-среза с колебаниями 5-го порядка.

Именно таким является генератор общепромышленного исполнения ГК87-ТС на диапазон частот 50–700 МГц. В диапазоне до 100–120 МГц частота автогенератора передается на выход без умножения, генератор с более высокой выходной частотой содержит встроенный умножитель на целое число

в пределах 2–7. Общий вид конструкции генератора представлен на рис. 15, спектр ФШ генератора частотой 100 МГц — на рис. 16, а генератора частотой 500 МГц показан на рис. 17.

Миниатюрный генератор ГК136-ТС с диапазоном частот 50–120 МГц разработан в 2003–2004 гг. на основе ГК87-ТС для применения в компактной аппаратуре, отличается от него значительно меньшими габаритными размерами (36×27×16 мм), повышенной стойкостью к механическим воздействиям и расширенным интервалом рабочих температур. Спектр ФШ идентичен ГК87-ТС без умножителя частоты. Только что завершена разработка и освоена модификация ГК136-ТС с напряжением питания 5 В, заметно расширяющая область применения этого прибора.

Генераторы ГК148-ТС и ГК174-ТС предназначены для использования в специальной аппаратуре. Их характерная особенность — сохранение очень низкого уровня ФШ при эксплуатации в условиях жестких механических воздействий.

С ростом частоты КР уменьшается толщина пьезоэлемента, что сопровождается воз-

растанием долговременной нестабильности частоты. С увеличением же номера используемой гармоники резонатора затрудняется подавление возбуждения нежелательных мод и гармоник. Кроме того, наблюдается снижение добротности резонаторов на гармониках свыше 5-й или 7-й. Поэтому верхняя граница частоты прецизионных малошумящих генераторов, подобных вышеупомянутым, без умножителей частоты на практике не намного превышает 100 МГц.

Совмещение в одном устройстве двух генераторов, связанных между собой системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), при различии их частот на порядок и более позволяет сочетать очень низкий ФШ в средней и дальней зонах (отстройка от несущей 1–10 кГц и более) с резко сниженным ФШ в ближней зоне (при отстройках 1–100 Гц), высокой долговременной и температурной стабильностью частоты. При этом высокочастотный генератор является управляемым и постоянно подстраивается под опорный — низкочастотный. В петлю ФАПЧ входит либо делитель частоты высокочастотного управляемого генератора, либо умножитель частоты низкочастотного опорного генератора.

Здесь принципиально важным является выполнение и термостатирование управляемого ВЧ-генератора в единой конструкции с опорным. Это позволяет существенно улучшить как стабильность частоты, так и спектральные характеристики данных приборов.

Генератор ГК137-ТС содержит термостатированные опорный и управляемый высокочастотный генераторы, связанные цепью ФАПЧ.

Температурно-частотная характеристика генератора дана на рис. 18. Спектр ФШ, показанный на рис. 19, в дальней зоне определяется высокочастотным генератором, а в ближней и средней — опорным низкочастотным генератором, с добавлением шумов, вносимых цепью ФАПЧ.

Основные параметры высокочастотных прецизионных КГ приведены в таблице 6.

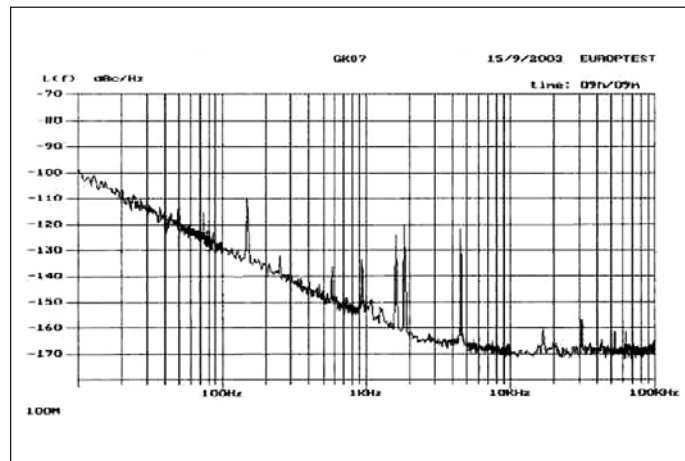


Рис. 16. Типовой спектр ФШ генераторов ГК87-ТС и ГК136-ТС частотой 100 МГц

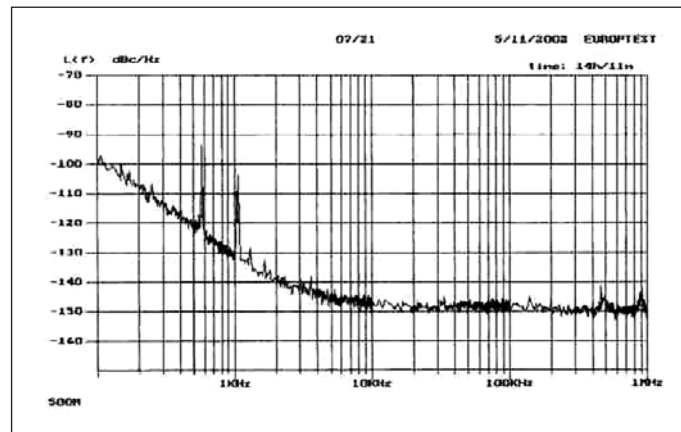


Рис. 17. Типовой спектр ФШ генератора ГК87-ТС частотой 500 МГц со встроенным умножителем частоты на 5

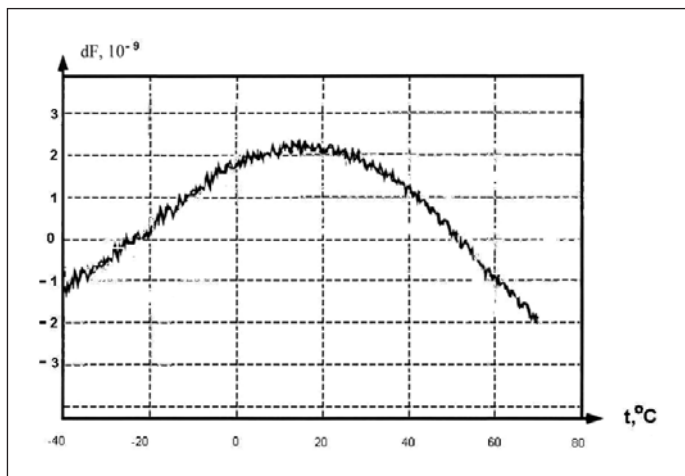


Рис. 18. Температурно-частотная характеристика генератора GK137-ТС частотой 100 МГц

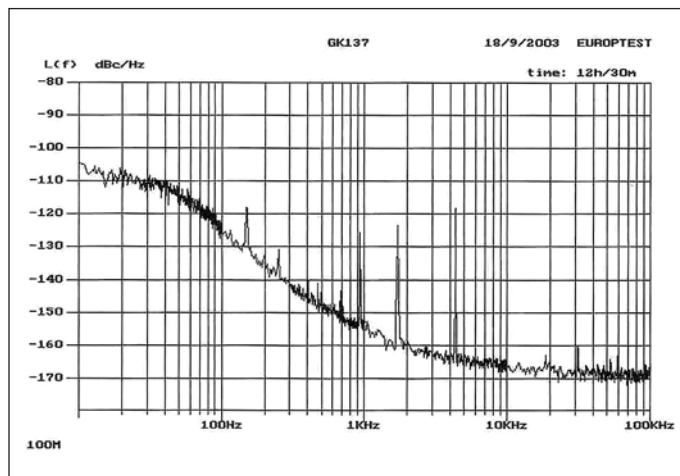


Рис. 19. Спектр ФШ генератора GK137-ТС частотой 100 МГц

Таблица 6. Основные параметры высокочастотных прецизионных КГ

Параметры	GK87-ТС	GK136-ТС	GK148-ТС	GK174-ТС	GK137-ТС	
Диапазон частот, МГц	50...700	50...120	56...100	—	—	
Стандартные частоты, МГц	61,44 100 500	100	56 80 100	56	100	
Габаритные размеры корпуса, мм	51×51×12,7	36×27×16	51×51×25	50×40×22	51×51×19	
Температурная нестабильность частоты в интервалах: -10...+60 (+70) °C -40...+70 °C -55...+70 °C	±1×10 ⁻⁷ ±1,5×10 ⁻⁷ —	±5×10 ⁻⁸ ; ±1×10 ⁻⁷ ±1,5×10 ⁻⁷ ±3×10 ⁻⁷	— — ±5×10 ⁻⁷	— — ±5×10 ⁻⁷	±1×10 ⁻⁹ ±2×10 ⁻⁹ ±3×10 ⁻⁹	
Долговременная нестабильность частоты: за год, ×10 ⁻⁸ за 10 лет, ×10 ⁻⁷	±3×10 ⁻⁷ ±2,5×10 ⁻⁶	±3×10 ⁻⁷ ±2,5×10 ⁻⁶	±5×10 ⁻⁷ ±2,5×10 ⁻⁶	±5×10 ⁻⁷ ±2,5×10 ⁻⁶	±5×10 ⁻⁸ ±2,5×10 ⁻⁷	
Фазовый шум, дБ/Гц, для частоты: при Δf=	100 МГц 10 Гц -95 -165	500 МГц 100 Гц -110 -145	100 МГц 10 Гц -95 -165	56 МГц 300 Гц -125 -160	56 МГц 300 Гц -125 -160	100 МГц 10 Гц -105 -165
Напряжение питания, В	12	12	5	12	12	
Потребляемый ток, мА: в установившемся режиме пиковый, при разогреве	120 400	150 500	300 950	400 600	400 600	300 700
Время установления частоты, мин	5 с точностью ±2×10 ⁻⁷	3 с точностью ±3×10 ⁻⁶	3 с точностью ±3×10 ⁻⁶	3 с точностью ±3×10 ⁻⁶	10 с точностью ±1×10 ⁻⁶	
Вибростойкость: диапазон частот, Гц ускорение, g	1-500 5	1-500 5	1-2000 5	1-2000 5	1-300 5	
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	100	100	100	100	100	

2. Высокостабильные малошумящие термокомпенсированные кварцевые генераторы

Термокомпенсированные КГ (ТККГ) заметно уступают термостатированным по стабильности частоты и уровню ФШ*, однако существенно лучше их по экономичности энергопотребления, по массогабаритным характеристикам и по скорости выхода на рабочий режим после включения. Поэтому они устойчиво занимают значительную часть рынка пьезоэлектронной продукции. В отличие от термостатированных генераторов, в термокомпенсированном генераторе кварцевый резонатор работает при температуре, практически совпадающей с температурой окружающей среды. Стабильность повышается за счет управляюще-

го воздействия, вызывающего изменения частоты, противоположные собственным температурным изменениям частоты резонатора, в идеале равные им по величине. К резонаторам, предназначенным для ТККГ, предъявляются повышенные требования в части «гладкости» температурно-частотных характеристик (ТЧХ). Соответствие этим требованиям в АО «МОРИОН» контролируется у каждого такого резонатора.

Устойчивое производство ТККГ на заводе «МОРИОН» началось в конце 1970-х годов. В настоящее время ОАО располагает действующим оборудованием и кадрами, позволяющими изготавливать в год десятки тысяч ТККГ общепромышленного и специального применения. Ниже приводится краткая характеристика выпускаемых АО «МОРИОН» ТККГ, причем особое внимание уделено приборам, изготовленным за последние два года.

Генератор GK88-ТК широко используется в современной аппаратуре. Он выпускается в двух вариантах, отличающихся выходным сигналом: с синусоидальным напряжением 300±75 мВ на нагрузке 50 Ом, или с ТТЛ/КМОП-совместимым сигналом. Фазовые шумы (см. рис. 20) удовлетворяют большинство современных потребителей.

Генератор GK96-ТК разработан для применения в специальной аппаратуре. Его особен-

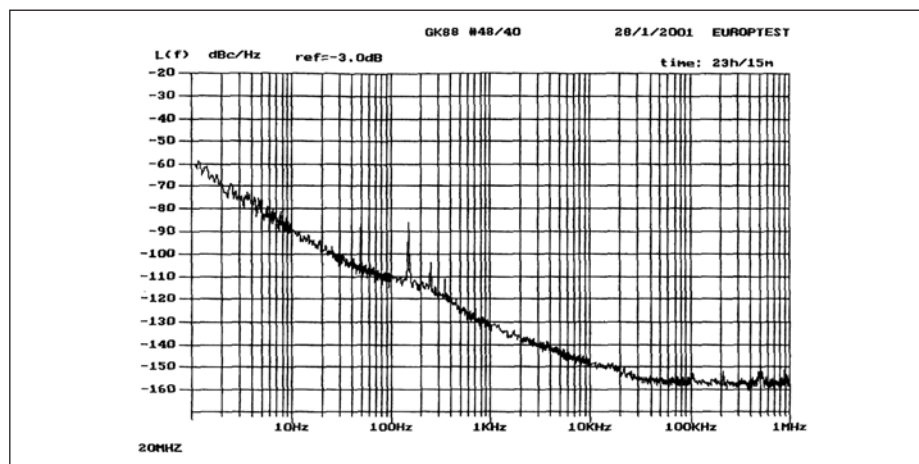


Рис. 20. Типовой спектр ФШ генератора GK88-ТК

*) Здесь надо помнить, что в отличие от ТСКГ ТККГ, как правило, строятся на резонаторах с колебаниями первого порядка, а не на обертонах.

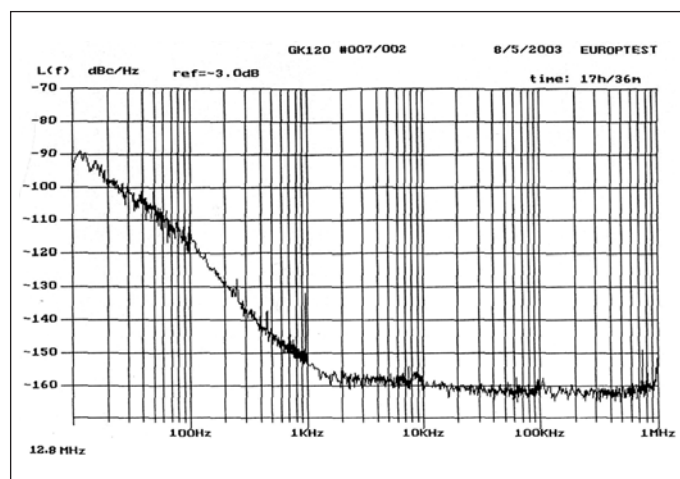


Рис. 21. Типовой спектр ФШ генератора GK120-ТК

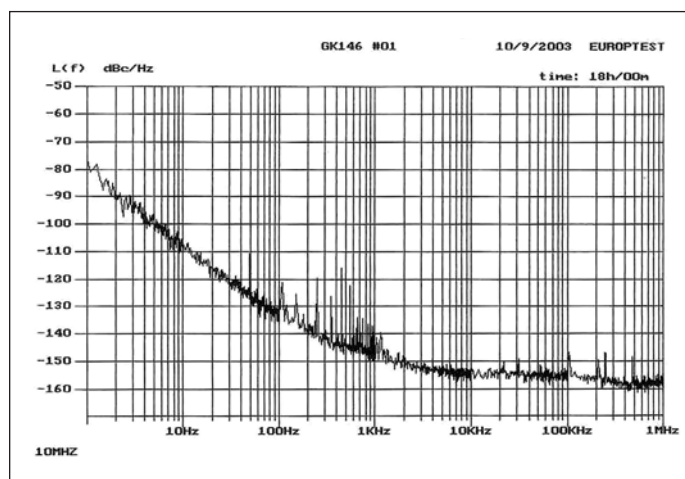


Рис. 22. Типовой спектр ФШ генератора GK146-ТК

ности — очень быстрый вход в режим после включения и стойкость к жестким условиям эксплуатации. Выходной сигнал — импульсный, ТТЛ/КМОП-совместимый.

Унифицированный генератор GK99-ТК разработан и поставляется для применения в специальной аппаратуре. Он выполнен в корпусе DIL-14 объемом 2,5 см³, обладает стойкостью к жестким условиям эксплуатации. По напряжению питания предусмотрено три варианта исполнения с номинальными значениями 2,7 В, 3 В и 5 В с допустимыми изменениями $\pm 5\%$ каждое. Выходной сигнал — синусоидальный, напряжением 400 ± 150 мВ на нагрузке 10 кОм, при допустимой емкости 5 пФ. При необходимости может быть согласована величина нагрузочной емкости более 5 пФ.

Генераторы GK120-ТК и GK121-ТК изготавливаются в общепромышленном исполнении, имеют малые габаритные размеры и массу. Особенность GK120-ТК — очень низкий уровень ФШ (см. рис. 21), особенность GK121-ТК — повышенное выходное напряжение 500 мВ на нагрузке 2 кОм.

Генераторы GK144-ТК, GK146-ТК и GK147-ТК предназначены для применения в специальной аппаратуре, характеризуются высокой стойкостью к воздействию внешних факторов. Напряжение питания GK144-ТК — 12 В, двух других — 5 В. GK146-ТК имеет синусоидальный выходной сигнал напряжением 300 ± 75 мВ на нагрузке 50 Ом, GK147-ТК — ТТЛ/КМОП-совместимый. На рис. 22 приведена типовая картина спектра ФШ генератора GK146-ТК. Отметим, что это весьма малошумящие генераторы.

Основные параметры ТККГ АО «МОРИОН» приведены в таблице 7.

Заключение

Сейчас АО «МОРИОН» уверенно входит в первую пятерку (и даже уже тройку!) мировых производителей опорных кварцевых генераторов наивысшей стабильности.

Таблица 7. Основные параметры термокомпенсированных генераторов

Параметр	ГК88-ТК	ГК96-ТК	ГК99-ТК	ГК120-ТК	ГК121-ТК	ГК144-ТК	ГК146-ТК ГК147-ТК
Частота (диапазон), МГц	9,6...20	19,183 * 19,683 * 3,317278	9,8...20	9,6...20	9,6...20	9,6...20	9,6...20
Размеры корпуса, мм	36×27×10	25×25×12,7	21×13×9,5 (DIL 14)	21×13×9,5 (DIL 14)	20×20×10	36×27×10 36×27×8,5 (св.16 МГц)	25×25×8,5 (ГК 146-ТК) 25×25×12,7 (ГК 147-ТК)
Температурная нестабильность частоты, $\times 10^{-4}$ (в интервале температур, °С)	$\pm 2,0$ (-40...+70); $\pm 0,5$ (-30...+55)	$\pm 4,5$ (-60...+80)	$\pm 3,0$ (-55...+75); $\pm 1,5... \pm 2$ (-40...+70)	$\pm 1,0$ (-30...+70)	$\pm 2,0$ (-40...+70)	$\pm 2,0$ (-60...+85) $\pm 0,5; 1,0$ (-40...+70) Sin, 10 МГц	$\pm 2,0$ (-60...+85) $\pm 1,0$ (-40...+70) ГК146, 10МГц
Долговременная нестабильность частоты за год, $\times 10^{-9}$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Фазовый шум, дБ/Гц, при отстройках от несущей: 10 Гц 10 кГц	-90 -140	-70 -140	-95 -145	-95 -155	-95 -145	-90 -145	-95 -145
Номинальное напряжение питания, В	12	5	2,7 3 5	12	12	12	5
Потребляемый ток, мА	4 (Sin)	30	12	5	6	9 (Sin); 20 (ТТЛ-КМОП)	15 (ГК146); 30 (ГК147)
Допустимые вибрации: диапазон частот, Гц ускорение, g	1-500 10	1-2000 15	1-2000 10	1-500 10	1-500 10	1-2000 10	1-2000 10
Механический удар одиночного действия: ускорение, g	500	1000	1000	100	500	1000	1000

* Возможен выпуск на частоту 20 МГц.

Генераторы с эксплуатационной стабильностью частоты от $\sim 10^{-9}$ до $\sim 10^{-10}$ успешно производятся десятками тысяч в год. А кроме того, высокочастотные прецизионные КГ, термокомпенсированные КГ высокого уровня, управляемые напряжением, и тактовые КГ, а также кварцевые фильтры и резонаторы. Объем продаж за 10 лет вырос в 20 раз. Более половины его — именно высокостабильные опорные генераторы. При этом «МОРИОН» — крупный экспортер таких приборов для ведущих телекоммуникационных компаний мира.

Результаты деятельности предприятия получили высокую оценку. Так «МОРИОН» дважды стал лауреатом конкурса на премию за достижения в области электроники — «Золотой Чип» на международной выставке «ЧипЭКСПО»: в 2004 году — в номинации «За вклад в развитие российской электроники», в 2005 году — в номинации «За лучшую инновационную идею».

Литература

- Вороховский Я. Базовые и перспективные модели прецизионных кварцевых генераторов для телекоммуникационных и навигационных систем // «Электронные компоненты». 2003, № 5. С. 57–61.
- Добровольский А. Высокочастотные прецизионные малошумящие кварцевые генераторы // «Электронные компоненты». 2003, № 8. С. 79–81.
- Яковлев С., Ильичев В. Высокостабильные малошумящие термокомпенсированные кварцевые генераторы — базовые модели и их развитие // «Электронные компоненты». 2004, № 2. С. 69–72.
- <http://www.morion.com.ru>
- Вороховский Я. «Чертова дюжина» основных шагов по коренной реорганизации предприятия. «Живая электроника России-2004». С. 17–19.
- Патент РФ № 2155442. Кварцевый резонатор с внутренним термостатированием. Петросян И. Г., кл. Н03Н 9/19, Н03Н 9/15, приоритет 4 июня 1999 г., опублик. 27 августа 2000 г., патентообладатель ОАО «МОРИОН».