

# Особенности применения кварцевых генераторов в радиоизмерительной аппаратуре

Ю. Иванов<sup>1</sup>, А. Никонов<sup>2</sup>

УДК 621.373 | ВАК 05.27.01

Стабильность частоты – один из ключевых параметров, определяющих работу многих измерительных систем. Кварцевые генераторы являются наиболее широко используемым источником стабильной частоты. Они вполне могут соперничать с рубидиевыми генераторами по стабильности выходной частоты, при этом обладая меньшими габаритами, стоимостью и потреблением, а главное – имеют значительно лучшие шумовые характеристики. В статье рассматриваются основные параметры кварцевых генераторов и даются рекомендации по достижению максимальной стабильности частоты при их использовании в радиоизмерительной аппаратуре.

**К**варцевые генераторы остаются самыми востребованными электронными компонентами, обеспечивающими приборы стабильной частотой. Они позволяют создавать радиоаппаратуру высокой точности с малыми габаритами и малой потребляемой мощностью. Стабильность частоты – это характеристика, в первую очередь, интересующая разработчиков радиоэлектронной аппаратуры. Конечно в разных видах аппаратуры свои требования к стабильности, отсюда и огромное разнообразие кварцевых генераторов, и разные подходы к измерению и обеспечению этой стабильности. Отклонение частоты обычно измеряется в долях от номинальной (или первоначальной) частоты. Относительное изменение частоты выражается формулой:

$$y = \frac{(f - f_0)}{f_0} = \frac{df}{f},$$

где  $f$  – измеренное значение частоты,  $f_0$  – номинальное (первоначальное) значение частоты.

Это безразмерная величина, которая обычно имеет очень малые значения, при этом, диапазон стабильности кварцевых генераторов очень большой – от  $10^{-6}$  до  $10^{-14}$ . Для генератора с частотой 10 МГц это означает, что отклонение от номинала 10 МГц может составлять от 10 до 0,0000001 Гц.

Основной элемент кварцевого генератора – кварцевый резонатор. Это вырезанная определенным образом пластина кварца, на которую с двух сторон нанесены электроды. Она является высокочастотным механическим резонатором, а благодаря пьезоэффекту его можно связать с электрической схемой. В результате чего получается автогенератор.

Кварцевый резонатор – высокостабильный компонент, однако, с ужесточением требований, предъявляемых к стабильности частоты, становится необходимым принимать дополнительные меры, направленные на увеличение стабильности генераторов под влиянием внешних воздействий. Рассмотрим основные виды нестабильностей кварцевых генераторов.

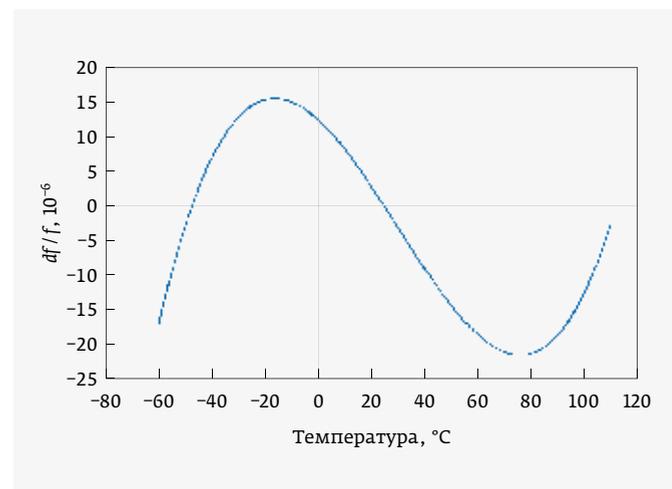


Рис. 1. Температурно-частотная характеристика (ТЧХ) резонатора АТ-среза

<sup>1</sup> АО «Морион», старший инженер-разработчик, тел.: +7 950 002-18-01, ivanov-ua@morion.com.ru.

<sup>2</sup> АО «Морион», заместитель начальника лаборатории разработки кварцевых генераторов, тел.: +7 950 048-73-62, nikonov@morion.com.ru.



**Рис. 2.** Разновидности кварцевых генераторов по стабилизации температуры

в АО «Морион», являются термостатированными. Самый стабильный в температуре генератор на 10 МГц, ГК360-ТС, характеризуется стабильностью  $\pm 1 \cdot 10^{-11}$  в интервале температур  $-40 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Современные термокомпенсированные кварцевые генераторы обеспечивают стабильность на уровне до  $\pm 1 \dots 5 \cdot 10^{-7}$ . При этом по габаритам и потреблению они практически не отличаются от простых тактовых генераторов без компенсации ТЧХ.

### ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Частота кварцевых резонаторов зависит от температуры окружающей среды. На рис. 1 представлен типовой график температурно-частотной характеристики (ТЧХ) кварцевых резонаторов АТ-среза. Срез резонатора показывает плоскость, вдоль которой вырезан резонатор из кристалла кварца. Он определяет характеристики резонатора и его стабильность. Универсального среза не существует, все они обладают своими особенностями, используемыми при разработке генераторов.

Частота резонатора изменяется на десятки ppm (parts per million,  $10^{-6}$ ) при изменении температуры в широких интервалах. С целью повышения стабильности кварцевые генераторы могут включать электрические цепи, компенсирующие изменение частоты. Это так называемые термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ, ТСХО). Кварцевые генераторы могут также содержать в себе термостат, поддерживающий постоянную температуру, внутри которого размещают резонатор и другие чувствительные к изменению температуры элементы, это – термостатированные кварцевые генераторы (ТСКГ, ОСХО) (рис. 2).

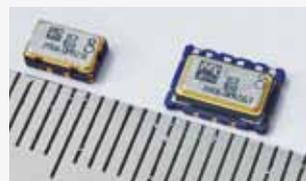
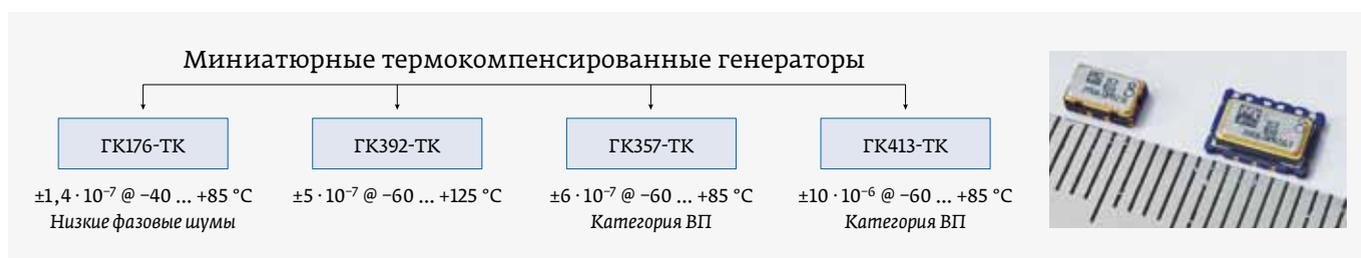
Наилучший способ обеспечить высокую температурную стабильность – это термостатирование. Термостатированные кварцевые генераторы могут демонстрировать стабильность от единиц  $10^{-8}$  до единиц  $10^{-11}$ , но при этом с ростом стабильности растут также габариты и потребление. Кроме того, таким генераторам нужно время после включения для нагрева термостата и выхода на рабочий режим [3]. Большинство генераторов, производимых

На сегодняшний день АО «Морион» представляет линейку термокомпенсированных генераторов в миниатюрных корпусах для поверхностного монтажа с габаритными размерами  $7 \times 5 \times 2 \text{ мм}$  и  $5 \times 3,2 \times 1,7 \text{ мм}$  (ГК176-ТК, ГК392-ТК, ГК357-ТК, ГК413-ТК) (рис. 3).

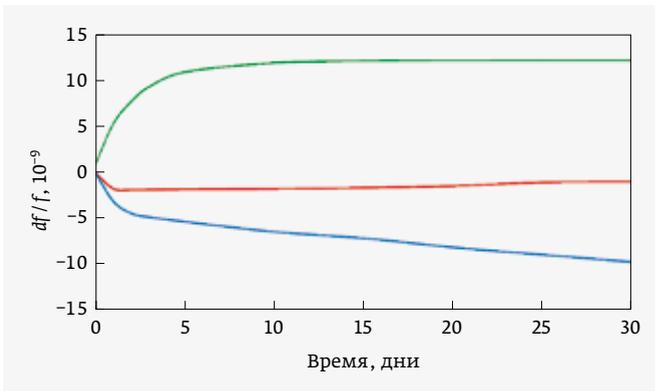
### ДОЛГОВРЕМЕННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Кварцевые резонаторы обладают такой особенностью, как старение. Оно характеризуется изменением частоты колебаний резонатора со временем. Частота колебаний резонатора напрямую связана с его толщиной – основной причиной старения является небольшое изменение толщины в связи с процессами абсорбции и десорбции. Кварцевая пластина содержит примерно 1 млн атомных слоев; изменения толщины даже на 1 атомный слой достаточно, чтобы частота отклонилась на  $1 \cdot 10^{-6}$ . Помимо этого, все материалы, используемые в процессе изготовления резонатора, могут немного менять свои характеристики, например клей, используемый для приклейки электродов или сами электроды [1]. Обычно частота кварцевого резонатора изменяется по логарифмическому закону. Направление ее изменения может быть произвольным (рис. 4).

Старение генератора зависит от частоты, для 10 МГц оно обычно составляет от нескольких единиц  $10^{-10}$  до нескольких единиц  $10^{-11}$  в день. Для 100 МГц примерно на порядок больше – от единиц  $10^{-9}$  до единиц  $10^{-10}$ . Также старение зависит от того, сколько времени генератор находился во включенном состоянии. Наиболее часто



**Рис. 3.** Миниатюрные термокомпенсированные генераторы производства АО «Морион»



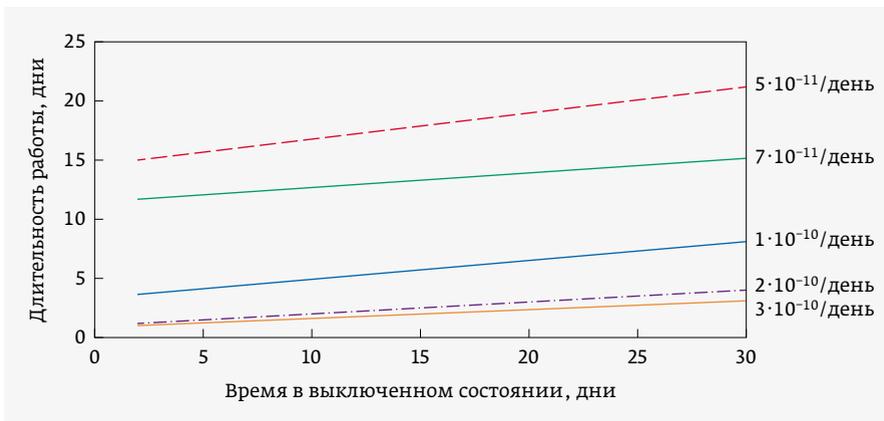
**Рис. 4.** Характерные кривые изменения частоты кварцевого генератора на частоту 10 МГц со временем работы

в спецификациях на кварцевые генераторы указывается величина старения через 30 суток после включения, если не указано иное.

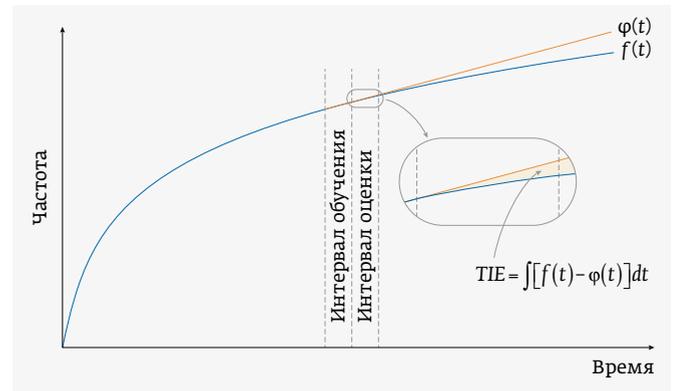
Если генератор выключается в процессе работы, ему снова требуется время, чтобы выйти на какой-то уровень старения. Типовые графики выхода прецизионных генераторов на 10 МГц на разные нормы по суточному старению показаны на рис. 5.

То есть если генератор показывал старение  $5 \cdot 10^{-11}$  за сутки и был выключен на пять суток, ему потребуется проработать 16 дней, чтобы снова выйти на уровень  $5 \cdot 10^{-11}$ . Поэтому всегда желательно обеспечивать постоянный режим работы кварцевого генератора в аппаратуре.

Обычно в спецификации указывается годовое старение генератора: например, для 10 МГц это будут величины на уровне  $1...5 \cdot 10^{-8}$ , а для 100 МГц –  $1...5 \cdot 10^{-7}$ . Годовое старение определяется прогнозированием изменения частоты по данным изменения частоты на протяжении нескольких недель. Авторами была проведена большая работа по испытаниям генераторов в течение очень долгого



**Рис. 5.** Типовое время выхода прецизионных генераторов на разные нормы по суточному старению от времени в выключенном состоянии



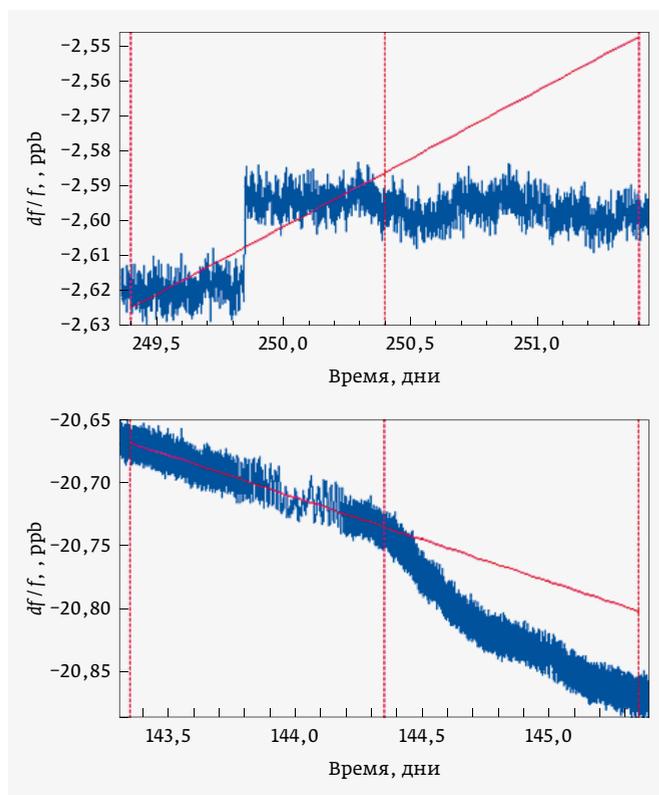
**Рис. 6.** Методика компенсации старения кварцевого генератора

времени и сравнению их с результатами прогноза по первым несколькими неделям. В результате был разработан адаптивный алгоритм оценки долговременной стабильности, который позволяет оценить годовое старение генераторов с высокой вероятностью до 99% [7].

Во многих телекоммуникационных системах очень важен такой параметр, как временная ошибка. Он представляет собой интеграл от изменения частоты за указанный интервал времени. Наиболее часто специфицируется временная ошибка за 24 ч. Это довольно длительный интервал, и основной вклад в эту ошибку вносит как раз старение генератора. Так, например, временная ошибка 1,5 мкс за сутки соответствует суточному старению  $2,3 \cdot 10^{-11}$ . Для кварцевых генераторов это очень жесткий критерий. Чтобы уменьшить влияние старения генератора в такой аппаратуре, очень часто применяется компенсация старения, суть которой сводится к тому, чтобы по известному ранее старению генератора, предсказать старение на следующий период. Это позволяет уменьшить временную ошибку в 3...5 раз (рис. 6) [5, 6].

Но это только при условии, что частота генератора будет изменяться в соответствии с прогнозированным значением. Иногда кварцевые резонаторы показывают резкие непрогнозируемые изменения частоты (скачки), а также плавные немонотонные изменения (рис. 7).

Такое изменение частоты, конечно, является непрогнозируемым и может приводить к значительному увеличению временной ошибки на отдельных временных интервалах и не позволяет осуществить компенсацию дрейфа. Единственный способ отбраковать такие резонаторы – проводить долговременную запись



**Рис. 7.** Скачки и немонотонное изменение частоты кварцевых генераторов

частоты и анализировать прогнозируемость изменения частоты. В АО «Морион» проводят 100%-ный контроль долговременной нестабильности частоты в течение нескольких недель. Кроме того, для генераторов с жесткими требованиями по временной ошибке можно проводить отбор именно по прогнозируемости. Это требует проведения испытаний в специальных стойках (рис. 8) и более тщательного анализа результатов.

Наиболее стабильные генераторы АО «Морион», ГК360-ТС, ГК336-ТС, способны удовлетворять нормам по временной ошибке за 24 ч вплоть до 400 нс [5, 6].

### КРАТКОВРЕМЕННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Еще один тип нестабильности – кратковременная нестабильность. Она составляет от  $10^{-14}$  до  $10^{-9}$  и имеет, главным образом, случайную природу. Зависит она, в первую очередь, от шумов кварцевого резонатора и других компонентов, входящих в состав генератора. Ее измерение возможно как во временной, так и в частотной области. Во временной области для этого, в основном, служит девиация Аллана (рис. 9), которая рассчитывается по формуле:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2,$$

где  $M$  – количество усреднений,  $y$  – отсчеты частоты, усредненные за время  $\tau$  [1, 2].

Среди генераторов АО «Морион» самый низкий уровень кратковременной нестабильности у ГК336R-ТС-10 МГц, который может иметь девиацию Аллана за 1 с не более  $8 \cdot 10^{-14}$  (рис. 10).

В частотной области кратковременная нестабильность чаще всего определяется однополосным фазовым шумом  $L(f)$ . Он представляет собой отношение спектральной плотности мощности, измеренной на определенной частотной отстройке в полосе 1 Гц, к полной мощности сигнала на несущей (номинальной) частоте и выражается в дБн/Гц (децибелы относительно несущей в полосе 1 Гц). Спектральная плотность мощности является непрерывной функцией отстройки по частоте и представляется в виде графика (рис. 11). В спецификациях на генераторы обычно указывают значения фазового шума при конкретных значениях отстроек, кратных 10.

Чем ниже фазовые шумы, тем стабильнее генератор. С ростом отстройки от несущей фазовые шумы уменьшаются и достигают нижнего предела (полки) примерно на отстройке 1 кГц для низкочастотных и 100 кГц для высокочастотных генераторов. Фазовые шумы низкочастотных генераторов характеризуются малым уровнем в ближней зоне (1–10 Гц), в то время как высокочастотные



**Рис. 8.** Оборудование для испытаний кварцевых генераторов на долговременную нестабильность

генераторы показывают очень низкие шумы в дальней зоне 10–100 кГц (рис. 12). Например, ГК317-ТС-100 МГц может иметь величину фазовых шумов на отстройке 100 кГц –185 дБн/Гц и даже лучше и поставяться с нормой –183 дБн/Гц (рис. 13).

Кварцевый генератор ГК336-ТС-10МГц, в свою очередь, может иметь величину фазовых шумов –95 и –124 дБн/Гц при отстройках 0,1 и 1 Гц соответственно (рис. 14).

Одна из недавних разработок АО «Морион», ГК359-ТС, представляет собой сборку из двух генераторов: на 10 и на 100 МГц. Сигнал высокочастотного генератора при

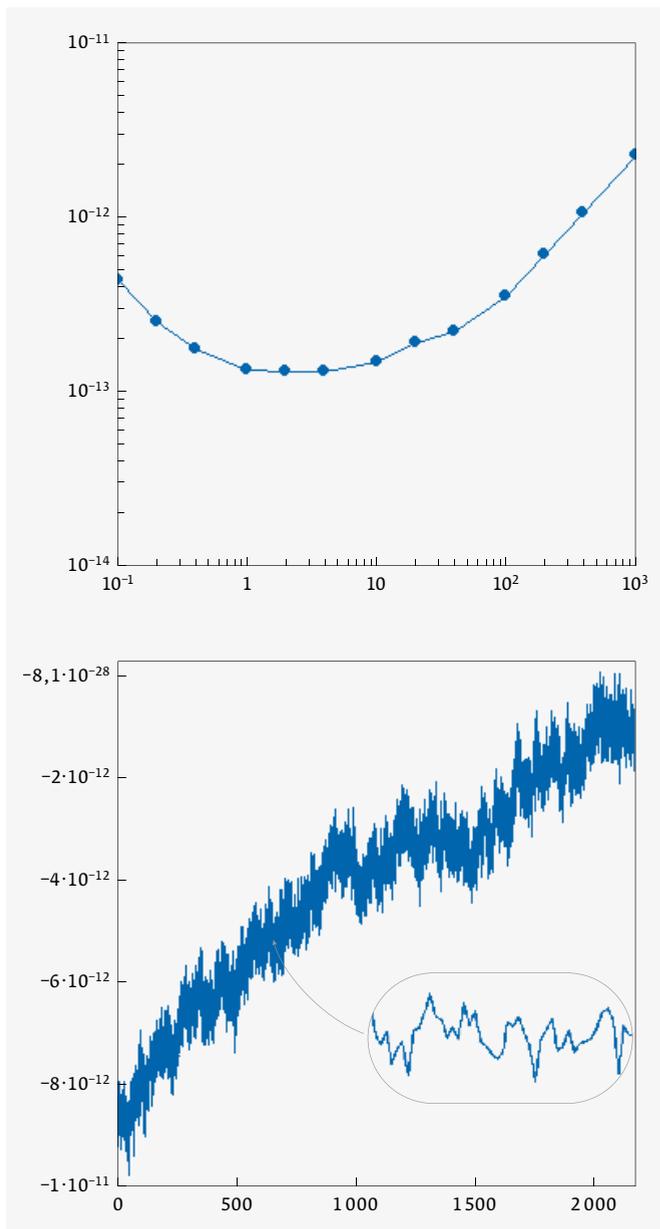


Рис. 9. График изменения частоты (вверху) и соответствующий ему график девиации Аллана при разном времени усреднения (внизу)

этом синхронизируется с помощью системы фазовой автоподстройки частоты с сигналом низкочастотного генератора. Это позволяет получить на выходе низкие фазовые шумы, как в ближней, так и в дальней областях (рис. 15).

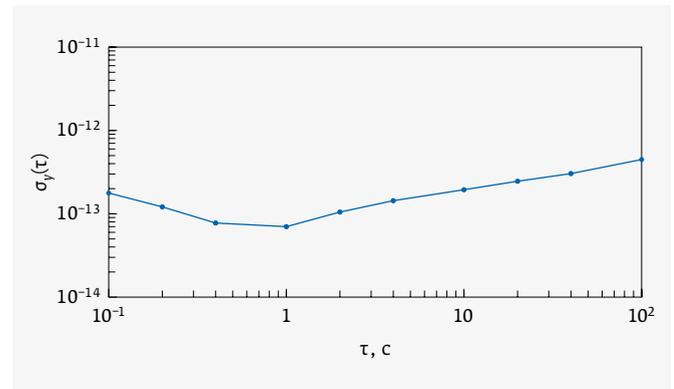


Рис. 10. График девиации Аллана для ГК336-ТС-10 МГц



Рис. 11. Спектральная плотность мощности фазовых шумов

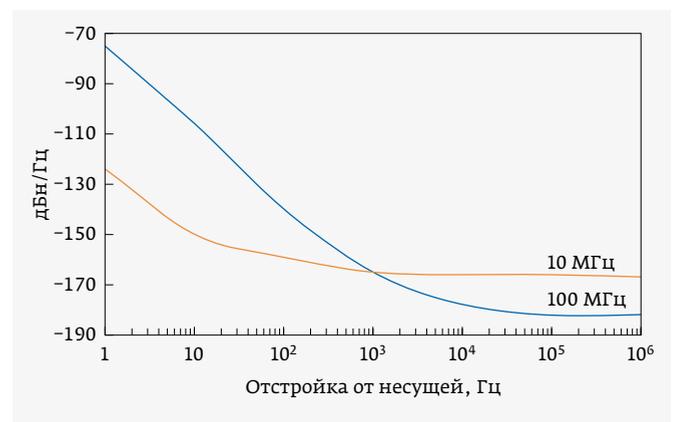


Рис. 12. Фазовые шумы кварцевого генератора ГК336-ТС-10 МГц и ГК317-ТС-100 МГц

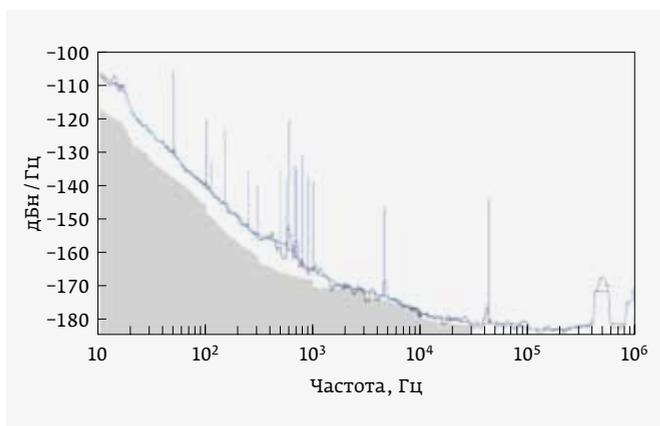


Рис. 13. Фазовые шумы ГК317-ТС-100 МГц

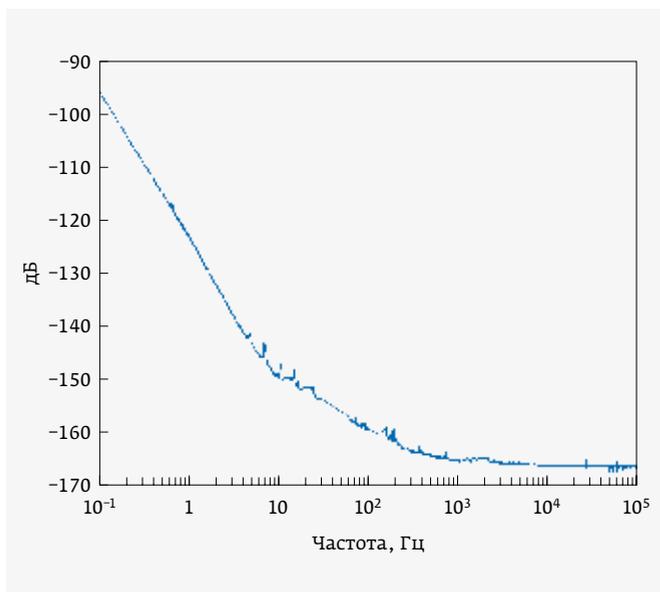


Рис. 14. Фазовые шумы GK336-ТС-10 МГц

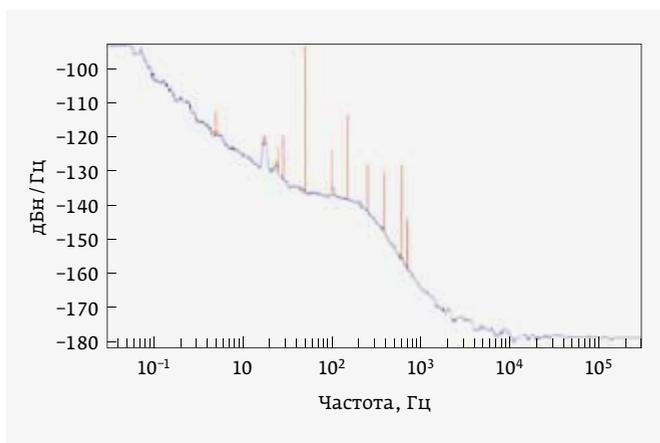


Рис. 15. Фазовые шумы GK359-ТС-100 МГц

### G-ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Частота колебаний кварцевого резонатора зависит от механических воздействий, приложенных к кварцевому элементу, и, соответственно, от ускорения, приложенного к резонатору. Это особенно критично для некоторых применений кварцевых генераторов, например при их работе на подвижной технике. Данный параметр принято называть G-чувствительностью генератора. Он определяется как относительное изменение выходной частоты генератора при воздействии ускорения  $1g$ . Величина возникшего частотного сдвига при этом может варьироваться от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  на  $1g$ . G-чувствительность является векторной величиной, так как зависит не только от величины, но и от направления ускорения относительно трех взаимно перпендикулярных осей генератора (рис. 16) [4].

Наибольший сдвиг частоты генератора произойдет в случае, если приложенное ускорение направлено параллельно вектору G-чувствительности. Величину и ориентацию вектора G-чувствительности (вектор  $\Gamma$  на рис. 16) определяют путем измерения отдельных взаимно ортогональных компонент в осях  $x, y, z$  (рис. 17).

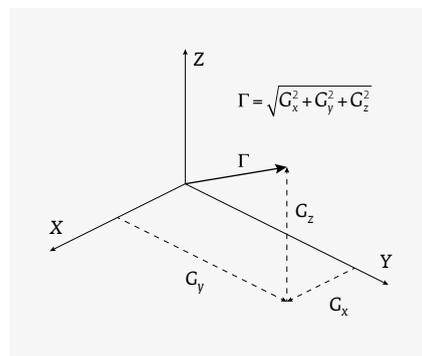
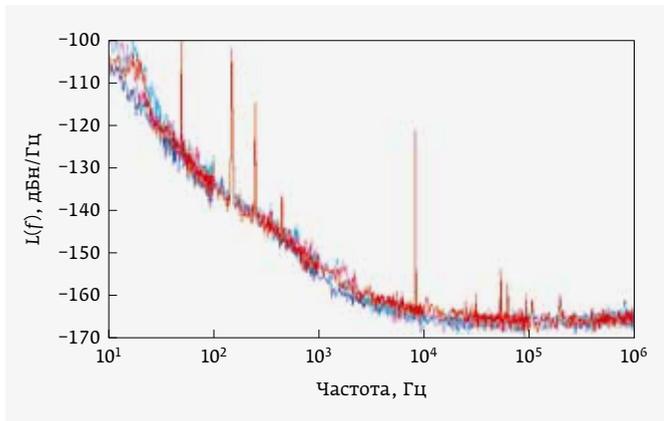


Рис. 16. Векторное представление G-чувствительности

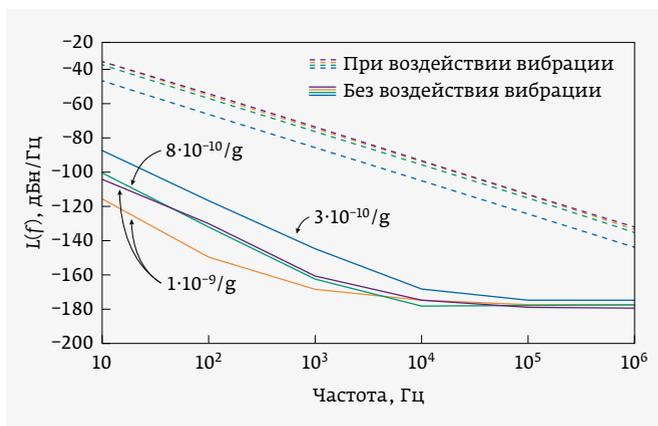


Рис. 17. Измерение G-чувствительности под воздействием вибрации

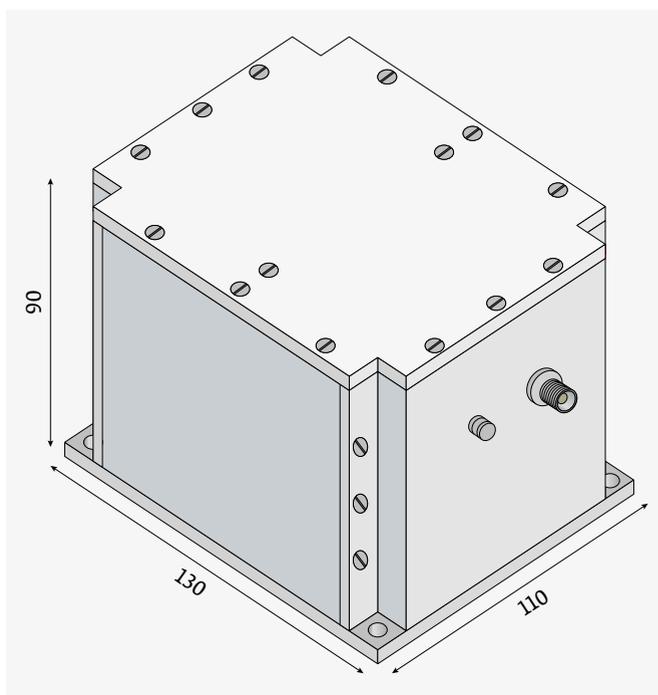
При воздействии случайного (шумового) ускорения на генератор происходит шумовая модуляция частоты и соответственно возникают дополнительные фазовые шумы. Следует понимать, что уровень фазовых шумов при воздействии вибраций зависит в первую очередь от G-чувствительности генератора и приложенной вибрации, а не от уровня фазовых шумов самого генератора. Так, например, два генератора на 100 МГц с разным уровнем фазовых шумов  $-129$  дБн/Гц и  $-149$  дБн/Гц на 100 Гц от несущей частоты и одинаковой величины G-чувствительности  $1 \cdot 10^{-9}/g$  при приложенной вибрации с амплитудой  $5g$  будут иметь одинаковый уровень



**Рис. 20.** Фазовые шумы GK213-TC без воздействия вибрации (синий) и при воздействии вибрации вдоль каждой из трех осей (красный, бирюзовый, фиолетовый)



**Рис. 18.** Фазовые шумы генераторов с различной G-чувствительностью



**Рис. 19.** GK213-TC в вибро- и акустозащищенном корпусе

фазовых шумов  $-52$  дБн/Гц на 100 Гц. А генератор с G-чувствительностью  $3 \cdot 10^{-10}/g$  будет иметь уровень фазовых шумов  $-63$  дБн/Гц на 100 Гц (рис. 18).

Для большинства своих генераторов АО «Морион» может изготавливать резонаторы с пониженной G-чувствительностью. Они отличаются от обычных количеством точек крепления, применяемыми электродами и технологией производства резонаторов. Например, GK317-100 МГц может иметь G-чувствительность менее  $2 \cdot 10^{-10}/g$ , а GK207-10 МГц –  $5 \cdot 10^{-10}/g$ .

Другим подходом к уменьшению влияния вибраций является изготовление системы механического подвеса генератора в оборудовании. Этот подход, в частности, реализован в GK213-TC (рис. 19). Он может быть изготовлен в вибро- и акустозащищенном корпусе, что позволяет получить G-чувствительность  $2...3 \cdot 10^{-11}/g$  (рис. 20).

### ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Выше мы рассмотрели основные виды нестабильностей кварцевых генераторов. Источников нестабильности очень много, следствием чего является очень широкая номенклатура генераторов, каждый из которых предназначен для своих целей. Однако для всех есть общие рекомендации по эксплуатации, соблюдая которые можно добиться максимальной стабильности.

- Желательно обеспечить постоянный режим работы генератора в аппаратуре. Старение кварцевых генераторов стабилизируется со временем, после каждого длительного выключения генераторам нужно время для выхода на определенный уровень старения. Непрерывная работа генератора не снижает его срок службы.
- Генераторы чувствительны к изменению температуры – эта нестабильность накладывается на все

- результаты измерений при колебаниях температуры. Термостатированные генераторы всегда поддерживают внутри температуру чуть выше верхней рабочей (на 10–15 °С), их принудительный обдув приводит к увеличению мощности, потребляемой термостатом, и увеличению флуктуации температуры и соответственно флуктуаций частоты. Чтобы уменьшить температурные флуктуации, генератор можно разместить внутри кожуха. По возможности следует температурно изолировать генератор от остальной схемы. Генераторы, особенно термостатированные, следует располагать в аппаратуре таким образом, чтобы они не подвергались воздействию воздушных потоков. Также следует предотвратить интенсивный отвод тепла от термостатированных генераторов.
- Генераторы чувствительны к вибрации. При эксплуатации в подобных условиях именно чувствительность к ускорению может стать фактором, лимитирующим шумовые характеристики и кратковременную стабильность. Необходимо использовать генераторы с низкой G-чувствительностью и/или предусмотреть виброзащиту для генератора.
  - Генераторы без управления частотой всегда будут немного стабильней, чем эти же генераторы с возможностью перестройки.
  - Неуправляемые генераторы, не имеющие возможности установки номинальной частоты, будут обладать большей стабильностью. В таких генераторах используется резонатор, который не доводится до номинала дополнительными технологическими операциями. В большинстве случаев в конечной аппаратуре точность соответствия номиналу не играет роли, это отклонение может быть учтено при математической обработке.
  - В термостатированных генераторах с аналоговым управлением частотой на общем выводе генератора возникает падение напряжения, зависящее от протекающего тока нагревательных транзисторов термостата. Оно попадает в цепь управления и ухудшает температурную и кратковременную стабильность частоты. Для уменьшения этого влияния необходимо предельно уменьшить сопротивление (длину) общей цепи протекающих токов питания генератора и цепи управления. Кардинальным способом является использование разных земель. Но такой путь снижает унификацию генераторов и накладывает достаточно серьезные ограничения на схемотехнику оборудования.
  - В генераторах с цифровым управлением в моменты изменения кода управления неизбежно ухудшение кратковременной нестабильности и фазовых шумов.
  - При соединении разнородных проводников, спаи которых находятся при разных температурах, в цепи управления возникает термоЭДС, которая может влиять на стабильность частоты. Этот эффект проявляется у генераторов с очень высокой температурной стабильностью порядка нескольких единиц  $10^{-11}$ .
  - В аппаратуре генератор следует размещать как можно ближе к тактируемым компонентам. Для питания генератора следует использовать малошумящие источники питания.
  - Выводы генераторов, отмеченные как не используемые, не следует подключать к земле или подавать на них какой-либо потенциал. Их можно соединить только с электрически изолированными площадками.
  - Управляющий вывод генератора, при его наличии, должен всегда быть подсоединен. Ни в коем случае нельзя оставлять его плавающим.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Vig J. R.** Quartz crystal resonators and oscillators: a tutorial. – US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ, USA, March 2004.
2. **Howe D. A., Allan D. W., Barnes J. A.** Properties of signal sources and measurement methods. – Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Symposium of Frequency Control, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. A1-A47=NIST Technical Note 1337, PP. TN14-TN60. May 1981.
3. **Котюков А. В., Никонов А. Г., Заславский А. В., Иванов Ю. А.** Особенности применения кварцевых генераторов с высокой температурной стабильностью // Электронные компоненты. 2020. № 8. С. 54–57.
4. **Иванов Ю. А., Никонов А. Г., Князева Э. Е.** Измерение G-чувствительности кварцевых генераторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 3. С. 124–129.
5. **Иванов Ю. А.** О подходе к оценке временной ошибки при применении прецизионных кварцевых генераторов (КГ) в новейших телекоммуникационных системах // Доклады VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. С. 30–35.
6. **Котюков А. В., Никонов А. Г., Иванов Ю. А.** Использование прецизионных генераторов в новейшей телекоммуникационной аппаратуре стандарта 5G // Доклады IX международного симпозиума. «Метрология времени и пространства». Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. С. 117–119.
7. **Nikonov A. G., Ivanov Y. A.** System for evaluation of long-term stability of precision quartz crystal oscillators and results of its use. – Proceedings of the 20, European Frequency and Time Forum, 2012.