



Особенности применения кварцевых генераторов с высокой температурной стабильностью

Александр Котюков, Аркадий Никонов (nikonov@morion.com.ru),
Алексей Заславский (zaslavsky@morion.com.ru),
Юрий Иванов (ivanov-ua@morion.com.ru)

Современные термостатированные кварцевые генераторы могут обеспечивать очень высокую температурную стабильность частоты вплоть до $\pm 1 \times 10^{-11}$ в широком диапазоне температур ($-40 \dots +85^\circ\text{C}$). Столь малые величины изменения частоты требуют некоторых особенностей при измерении и, соответственно, при эксплуатации таких генераторов. В статье рассматриваются особенности эксплуатации подобных генераторов, методики измерения температурной стабильности, а также влияние других факторов на неё.

Одним из ключевых параметров кварцевых генераторов является температурная стабильность частоты. Существует несколько разных методов её обеспечения:

1. в простых (тактовых) кварцевых генераторах (КГ) температурная стабильность обеспечивается только самим кварцевым резонатором за счёт выбора угла среза кварцевого элемента. Температурная стабильность для таких генераторов может составлять $\pm(10 \dots 15) \times 10^{-6}$ в интервале температур $-40 \dots +85^\circ\text{C}$;
2. в термокомпенсированных кварцевых генераторах (ТККГ) присутствуют дополнительные элементы, которые формируют управляющее напряжение, компенсирующее зависимость выходной частоты от температуры. Температурная стабильность

для таких генераторов может составлять $\pm(1 \dots 3) \times 10^{-7}$ в интервале температур $-40 \dots +85^\circ\text{C}$;

3. в термостатированных кварцевых генераторах (ТСКГ) кварцевый резонатор и основная часть элементов находятся в термостате, поддерживающем постоянную температуру. Температурная стабильность для таких генераторов может составлять до $\pm(1 \dots 5) \times 10^{-11}$ в интервале температур $-40 \dots +85^\circ\text{C}$.

На графиках рисунка 1 представлена зависимость частоты от температуры для разных видов кварцевых генераторов.

Далее будут рассмотрены именно термостатированные генераторы, причём только самые высокостабильные.

Для начала рассмотрим детально базовую конструкцию термостатированных генераторов. Как уже было сказано, в подобных генераторах все чувствительные к изменению температуры элементы находятся внутри термоста-

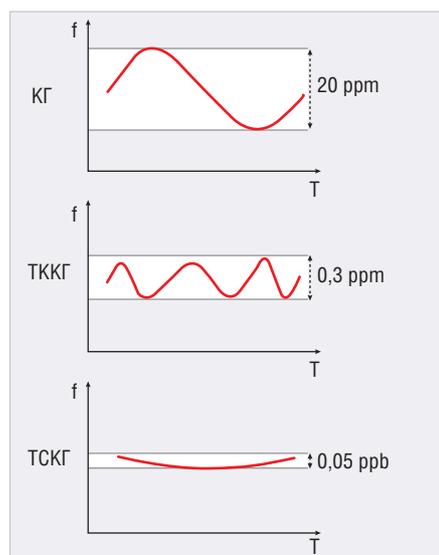


Рис. 1. Зависимость частоты от температуры для разных видов кварцевых генераторов

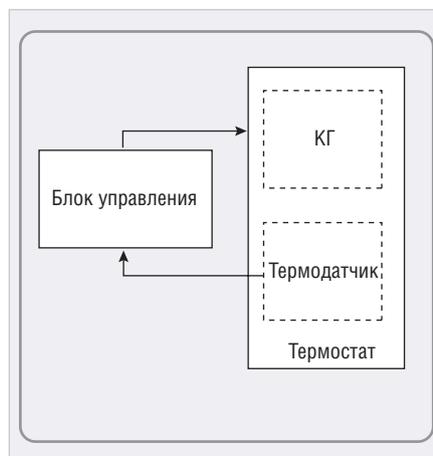


Рис. 2. Схема конструкции термостатированного генератора

та, в котором поддерживается постоянная температура. Схематически это можно представить следующим образом (см. рис. 2).

Температура внутри термостата устанавливается несколько выше (обычно на $5 \dots 15^\circ\text{C}$) верхней рабочей температуры эксплуатации генератора. Кроме того, она настраивается таким образом, чтобы температурная зависимость резонатора находилась в районе какого-то из его экстремумов (точки LTR и UTR на рисунке 3). Таким образом, обеспечивается минимальное изменение частоты кварцевого генератора от изменения температуры окружающей среды.

Необходимость поддержания высокой температуры термостатом приводит к следующим отличительным чертам термостатированных кварцевых генераторов:

- повышенный ток потребления при включении. Как только температура внутри термостата достигает заданного уровня, ток потребления существенно уменьшается;
- необходимость первоначального прогрева. Характеризуется точностью установления частоты в определённых пределах за фиксированное время. Обычно составляет от 2 до 5 мин при температуре $+25^\circ\text{C}$ с точностью до $\pm 2 \times 10^{-8}$.

Подобная базовая модель может обеспечить температурную стабильность от $\pm 1 \times 10^{-8}$ до $\pm 5 \times 10^{-10}$ в зависимости от конструкции. Существует несколько путей повышения температурной стабильности описанной конструкции:

1. использование двойного термостата. В подобных генераторах используется дополнительный термостат, внутрь которого помещается базовый термостат. Это достаточно эффективный путь, который обычно позволяет достичь стабильности до $\pm 1 \times 10^{-10}$. Однако такой вариант несёт в себе неизбежные издержки: относительно большие габариты и ограничение верхней рабочей температуры эксплуатации генератора из-за необходимости делать большую раз-

ницу между рабочей температурой и температурой термостата;

- использование дополнительной температурной компенсации. Итоговая зависимость частоты от температуры базовой конструкции обычно носит более или менее линейный характер, что дополнительно позволяет относительно просто её компенсировать. Из недостатков этого метода следует отметить довольно высокую крутизну итоговой зависимости частоты от температуры, что может нивелировать всё улучшение. Применение подобного метода к термостатированным генераторам обычно позволяет увеличить температурную стабильность до 5 раз;
- наиболее сложный, но дающий наилучшие результаты метод «вылизывания» базовой конструкции. Заключается он в тщательном расчёте и долгом многоитерационном процессе доработки конструкции конкретного типа генераторов для получения лучшей температурной стабильности. В частности, за счёт понижения температурных градиентов можно достичь температурной стабильности, получаемой у генераторов с двойным термостатированием, но при этом сохранив габариты и в особенности высоту базовой конструкции.

Для получения эксклюзивно высокой температурной стабильности, например до $\pm 1 \times 10^{-11}$, приходится в полной мере реализовывать все выше описанные меры улучшения температурной стабильности.

Как при эксплуатации, так и при измерении параметров генераторов с высокой температурной стабильностью могут возникать дополнительные факторы, влияющие на температурную стабильность, которые необходимо учитывать. Например, выходная частота кварцевых генераторов изменяется с течением времени. При этом крайне важно, сколько времени генератор находился во включённом состоянии. Так, для генераторов, включённых в течение нескольких недель, суточное изменение частоты будет составлять несколько единиц 10^{-11} , а для генераторов, включённых всего 1 день, эта величина уже будет несколько единиц 10^{-10} . Нетрудно заметить, что такой вклад будет заметен при измерении температурной стабильности, тем более когда она мала и сопоставима с таким уходом. Таким

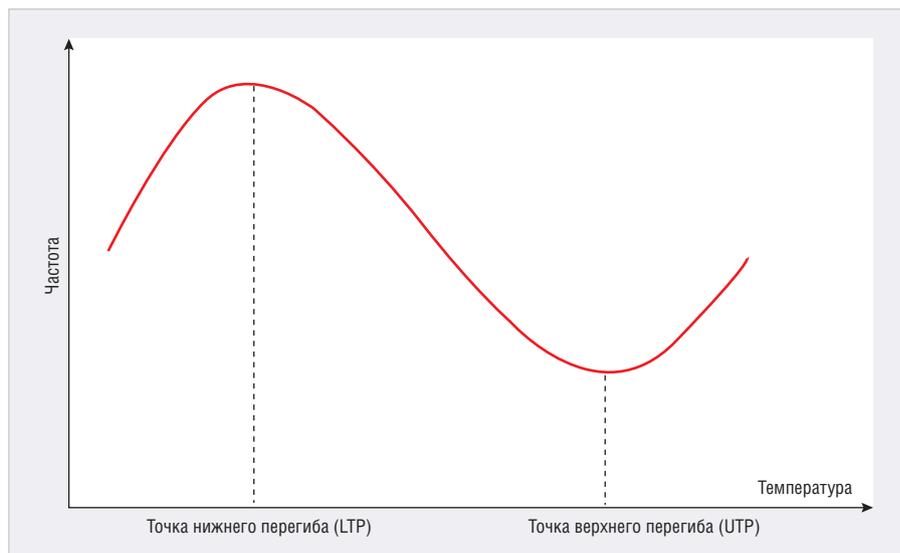


Рис. 3. Типовая зависимость частоты от температуры для кварцевого резонатора

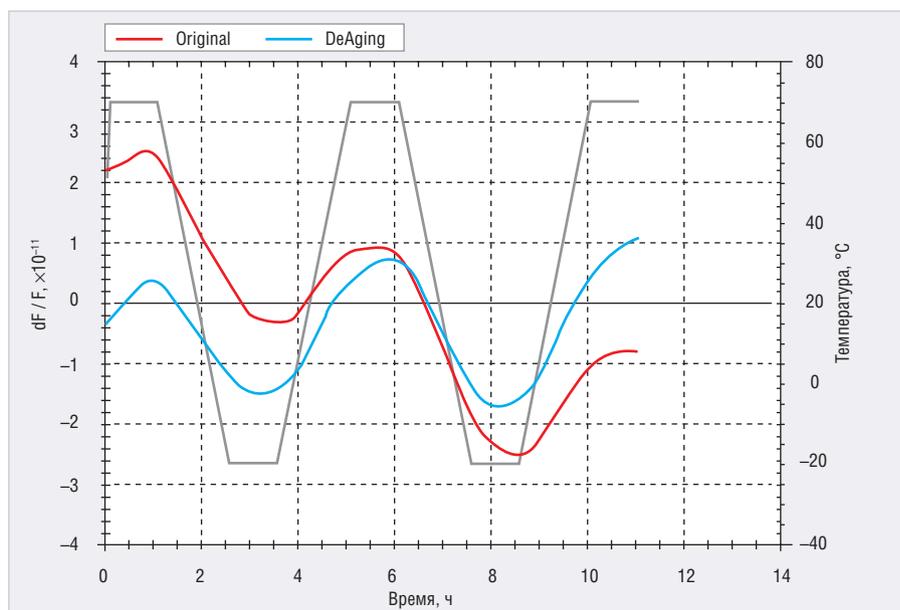


Рис. 4. Результат измерения температурной стабильности генератора ГК360-ТС производства АО «Морион»

образом, при оценке стоит учитывать дрейф частоты генератора. Сделать это довольно просто: необходимо выдержать генератор при некоторой постоянной температуре и фиксировать его частоту. Далее по полученным результатам можно построить модель ухода частоты с течением времени (для недолгих промежутков времени вполне хватит простой линейной модели). Обычно при испытаниях генераторов с очень высокой температурной стабильностью приходится делать несколько циклов нагрева/охлаждения, чтобы убедиться, что генератор удовлетворяет нормам по температурной стабильности. Влияние дрейфа частоты отчетливо видно на результатах испытаний

генератора ГК360-ТС производства АО «Морион» (см. рис. 4).

На рисунке 4 красным цветом показана исходная характеристика, снятая в процессе измерений. Видно, что она обладает линейным наклоном, связанным со старением генератора. Синим цветом показана эта же характеристика, но с вычтенным дрейфом.

Как уже было отмечено, если для повышения температурной стабильности используется дополнительная компенсация, то на итоговой характеристике могут присутствовать отдельные участки с сильной крутизной. Подобная ситуация несильно выражена для термостатированных кварцевых генераторов, но очень заметна в случае с рубидиевыми генераторами.

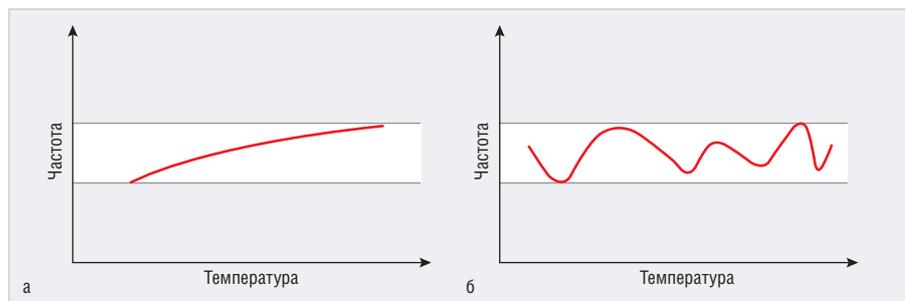


Рис. 5. Сравнение зависимости частоты от температуры для генераторов: а) с линейной температурно-частотной характеристикой (ТЧХ); б) с сильно меняющейся ТЧХ

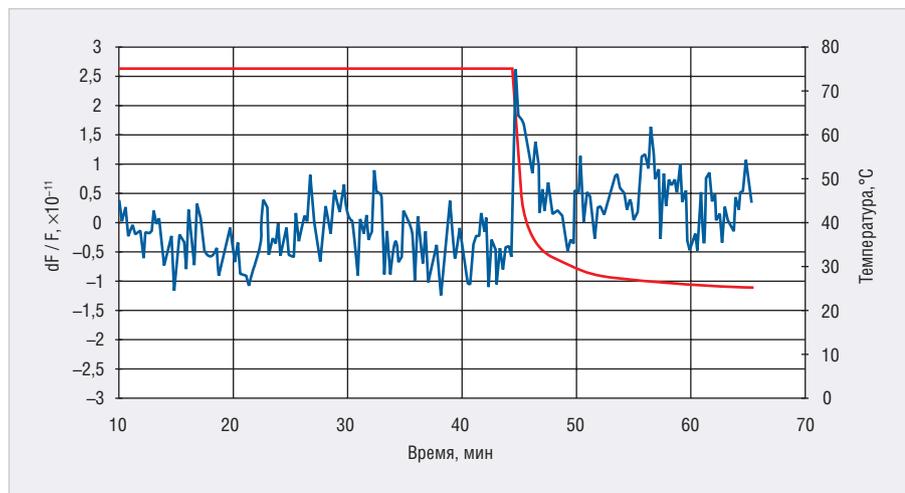


Рис. 6. Пример малой реакции на температурный удар для ГК360

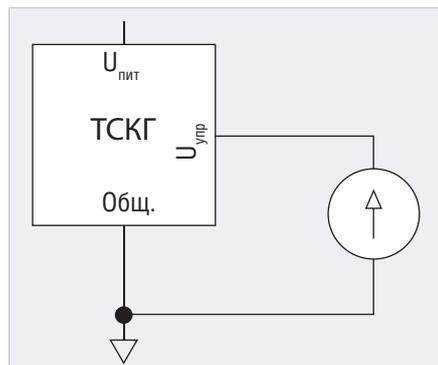


Рис. 7. Схема включения генератора с аналоговым управлением с общей землёй

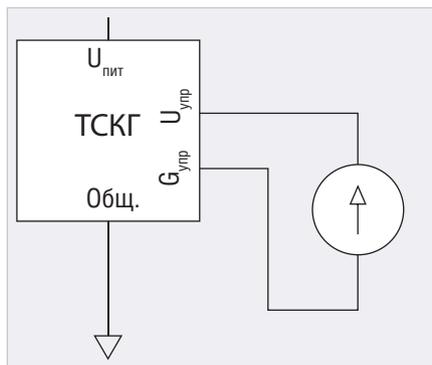


Рис. 8. Схема включения генератора с аналоговым управлением с отдельными землями

На рисунке 5 показаны две разные зависимости частоты от температуры. В первом случае (см. рис. 5а) при малом изменении температуры изменение частоты будет также пропорционально мало. Во втором случае (см. рис. 5б) при малом изменении температуры частота может измениться существенно больше, вплоть до значения температурной стабильности во всём интервале.

Также из-за компенсации или неудачной конструкции можно наблюдать большие изменения частоты, многократно превышающие норму при быстром изменении температуры.

У термостатированных генераторов с высокой температурной стабильностью вполне возможно наблюдать изменение формы и величины зависимости частоты от температуры при изменении их ориентации (см. рис. 6). Происходит это вследствие конвекции внутри объёма генератора. У правильно разработанного генератора такая зависимость должна быть сведена к минимуму и учтена при испытаниях.

Говоря о термостатированных генераторах сверхвысокой стабильности, отдельно стоит акцентировать внимание на проблемах, возникающих при подстройке частоты генератора

с помощью управляющего напряжения. Наличие этой функции напрямую влияет на стабильность генератора. Когда речь идёт о столь малых величинах нестабильности, вклад наличия перестройки становится особо остро заметен. Генератор без такой опции будет обладать большей температурной и кратковременной стабильностью, чем с ней. Например, температурную стабильность генератора без перестройки можно довести до $\pm 1 \times 10^{-11}$, тогда как с перестройкой эта величина уже будет $\pm 2 \times 10^{-11}$. Соответственно, при необходимости лучшей температурной стабильности предпочтение должно быть отдано системам, в которых допустимо применение генератора без возможности перестройки частоты.

Перестройка может обеспечиваться либо аналоговой цепью, либо цифровой. Генераторы с цифровым управлением содержат внутри себя ЦАП и управление частотой осуществляется подачей кода. Управление ЦАП возможно по протоколу I²C или SPI. При цифровом варианте управления деградация температурной стабильности минимальна, однако при изменении кода управления возможно ухудшение кратковременной нестабильности и фазовых шумов.

Ещё одним ограничением является минимальный фиксированный шаг перестройки, который зависит от разрядности ЦАП и для 20-битного ЦАП составляет от 5×10^{-13} до 10×10^{-13} .

В генераторах с аналоговым управлением для приведения частоты генератора к номиналу на вход управления необходимо подать управляющее напряжение (см. рис. 7).

На земляном выводе генератора возникает падение напряжения, зависящее от протекающего тока нагревательных транзисторов термостата. При таком подключении оно попадает в цепь управления и ухудшает температурную и кратковременную стабильность частоты.

Для уменьшения этого влияния необходимо уменьшить сопротивление (длину) общей цепи протекающих токов питания генератора и цепи управления. Кардинальным способом является использование разных земель (см. рис. 8). Но такой путь снижает унификацию генераторов и накладывает достаточно серьёзные ограничения на схемотехнику оборудования.

Ещё одним нюансом эксплуатации сверхвысокостабильных генераторов

являются применяемые материалы, т.к. при соединении разнородных проводников, спаи которых находятся при разных температурах, в цепи управления возникает термоЭДС, которая будет влиять на температурную стабильность частоты.

Чем выше температурная стабильность, тем сильнее будут влиять все вышеописанные явления.

Генераторы с высокой температурной стабильностью могут успешно применяться во многих областях, где необходима очень стабильная частота. Обладая меньшими габаритами и потреблением, они могут посоревноваться с рубидие-

выми генераторами в некоторых областях применения. Их зависимость частоты от изменения температуры гораздо более линейна и обладает меньшей крутизной. Таким образом, при небольших изменениях температуры окружающей среды она будет существенно выше, чем у рубидиевых генераторов. Единственно, в отличие от рубидиевых термостатированные кварцевые генераторы обладают большим старением, но в случае крайне малого изменения частоты при изменении температуры его влияние можно компенсировать.

В статье были рассмотрены особенности конструкции термостатиро-

ванных генераторов и методы улучшения температурной стабильности, а также приведены некоторые нюансы использования подобных генераторов.

Литература

1. *John R. Vig*. Quartz crystal resonators and oscillators: a tutorial, US Army. Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ. USA. March. 2004.
2. *Kolyukov A., Ivanov Y., Nikonov A.* Precise Frequency Sources Meeting the 5G Holdover Time Interval Error Requirement. Microwave journal. May. 2018. 

НОВОСТИ МИРА

ANSYS ПРИОБРЕЛА РЕШЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ LUMERICAL

Компания Ansys сообщила о приобретении Lumerical, лидера в области высокоэффективного моделирования кремниевой фотоники. Это позволит добавить передовые программные продукты для моделирования фотоники к мультифизическому портфолио Ansys и предоставить клиентам полный набор решений для вопросов, связанных с проектированием изделий следующего поколения.



Компания Lumerical разрабатывает программное обеспечение для моделирования на уровне компонентов, использующее многодисциплинарные рабочие процессы для моделирования оптических, электрических и тепловых эффектов на физическом уровне. Компания предоставляет решение для моделирования на системном уровне, с богатым набором аналитических возможностей для проектирования и оптимизации характеристик электрооптических устройств. Продукты Lumerical используются компаниями, разрабатывающими фотонные устройства, такими как Avalon Holographics, CompoundTek, LIGNETEC и Rockley Photonics.

Приобретение Lumerical является логичным продолжением реализации стратегии Ansys по внедрению инноваций и улучшений с перспективой на будущее. Кроме того, Ansys стремится расширять охват и пре-

доставлять технологии моделирования для всех сегментов промышленности, и технологии Lumerical открывают для Ansys индустрию фотоники.

Кремниевая фотоника – это расширяющийся рынок, и Lumerical, аналогично традиционной среде автоматизации проектирования электроники, предоставляет полный набор инструментов для проектирования и анализа компонентов фотонных интегральных схем и систем. Lumerical дополняет Ansys SPEOS, фактически выступая в качестве источника света для прогнозирования освещенности и оптических характеристик таких систем, как внутреннее освещение автомобиля.

«Фотоника представляет собой достаточно обширную совокупность различных рынков, так или иначе использующих фотонные технологии, – это и информационные технологии, биофотоника, оборона и безопасность, энергетика и освещение. Можно также отметить наличие существенной специализации стран на определенных сегментах рынка фотоники. Так, Южная Корея, Япония и КНР специализируются на рынках массовой продукции: производстве дисплеев, освещении и фотовольтаике. Сегменты коммуникаций, ИТ и машинное зрение развиваются в США и европейских странах. Высокий потенциал фотоники как для традиционных рынков (ИКТ, оборона/безопасность), так и формирующихся новых (биофотоника) вызвали пристальный интерес к данному направлению и в России, – комментирует Денис Хитрых, директор по маркетингу «КАДФЕМ Си-Ай-Эс». – Сегодня в России в данной области работает более 1000 организаций, при этом многие российские компании демонстрируют

высокую экспортную активность, что свидетельствует о наличии в нашей стране конкурентоспособных разработок. С другой стороны, российский рынок фотоники сегодня представляет собой крайне ограниченный сегмент мирового рынка, со специализацией в области безопасности и обороны. Использование современных компьютерных технологий таких как, Ansys, Lumerical DEVICE Suite и SYSTEM Suite на самом раннем этапе проектирования фотонных устройств позволит российским компаниям усилить конкурентоспособность разрабатываемых и выпускаемых на рынок изделий, и в полном объеме раскрыть свой экспортный потенциал».

С появлением приложений с 5G, а также автономных транспортных средств, организации будут вынуждены обрабатывать больший объем данных за более короткие сроки, чем когда-либо. Традиционные средства передачи данных будут заменены более эффективными оптическими сетями. Продукты Lumerical для моделирования нанофотонных устройств позволяют разработчикам решать самые сложные задачи фотоники, которые включают в себя взаимосвязанные оптические, электрические и тепловые эффекты. Решения Lumerical могут улучшить производительность архитектуры дата-центров, устранив узкие места в сети, потенциально сократив полную стоимость владения. Дополнительно приобретение Lumerical позволит клиентам Ansys прогнозировать поведение света в сложных фотонных структурах и системах.

Ожидается, что сделка не окажет существенного влияния на сводный финансовый отчет Ansys в 2020 году.

Пресс-релиз Ansys