

Современные кварцевые и рубидиевые генераторы

Ю. Иванов¹

УДК 621.38 | ВАК 2.2.2

В качестве источников опорной частоты в телекоммуникационной аппаратуре чаще всего используются рубидиевые или прецизионные кварцевые генераторы. Каждый из этих типов генераторов обладает своими достоинствами и недостатками, при этом их стабильность может быть вполне сопоставима в конечном итоге.

Сердцем кварцевого генератора является кварцевый резонатор. Это изготовленная особым 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, необходимо принимать дополнительные меры стабилизации, направленные на увеличение стабильности генераторов к влиянию внешних воздействий.

Основу рубидиевого генератора составляет рубидиевая ячейка – стеклянная колба, заполненная парами изотопа рубидия, которая находится внутри микроволновой камеры со стеклянными окнами с двух сторон. Она просвечивается рубидиевой лампой, а прошедший свет фиксируется фотоприемником с другой стороны камеры. При этом на камеру подается модулированный сигнал от опорного источника (кварцевого генератора). Таким образом, можно точно совместить микроволновый сигнал с резонансной частотой рубидия, так как оптическое поглощение газа рубидия изменяется на резонансной частоте. Стабильность частоты при этом определяется стабильностью атомной линии рубидия.

СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ

И для кварцевого и для рубидиевого генератора основной параметр – стабильность частоты, она зависит от многих факторов. Чаще всего стабильность выражается в долях отклонения от номинальной (первоначальной) частоты. Так относительное изменение частоты y выражается как

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

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

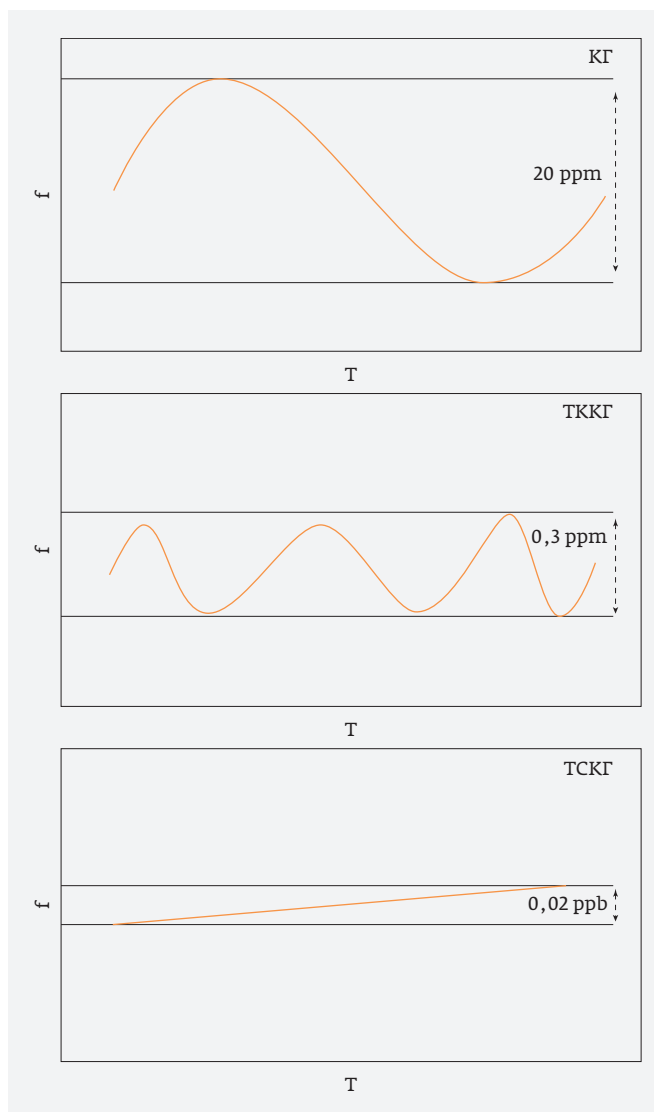


Рис. 1. Зависимость частоты от температуры для разных видов кварцевых генераторов

¹ АО «Морион», старший инженер-разработчик,
Ivanov-UA@morion.com.ru.

Посмотрим влияние некоторых внешних факторов на стабильность частоты для этих типов генераторов. Начнем с температурной стабильности.

Частота кварцевого резонатора даже с учетом применения специальных срезов (например, АТ) изменяется на десятки ppm (parts per million, 10^{-6}) при изменении температуры в широких интервалах. С целью повышения стабильности кварцевых генераторов возможно включение электрических цепей, компенсирующих это изменение частоты – термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ, ТСХО). Если применяется термостат, поддерживающий постоянную температуру, внутри которого размещают резонатор и другие чувствительные к изменению температуры элементы, то это уже будут термостатированные кварцевые генераторы (ТСКГ, ОСХО). Термостатированные кварцевые генераторы могут обеспечить стабильность от единиц 10^{-9} до единиц 10^{-11} . Таким генераторам нужно время после включения для нагрева термостата и выхода его на рабочий режим.

В самых прецизионных генераторах применяется двойное термостатирование, что влечет за собой увеличение их габаритов и потребления, зато на выходе влияние температуры практически нивелируется. При испытаниях таких генераторов приходится уже устранять влияние старения резонатора (о чем пойдет речь ниже), проводя несколько циклов и вычитая линейный дрейф. На рис. 1 представлены типовые графики температурной стабильности.

Стабильность частоты рубидиевой ячейки также сильно зависит от изменения температуры. Для уменьшения влияния применяется термокомпенсация, это позволяет достичь стабильности, равной единицам 10^{-10} и даже чуть ниже. При этом, если для термостатированного кварцевого генератора справедливо, что при работе в более узком температурном интервале температурная нестабильность пропорционально уменьшается, то для термокомпенсированного рубидиевого генератора это не работает. На небольшом интервале температур вполне возможно получить полное изменение частоты в рамках нормы во всем интервале. Для наглядности можно сравнить графики ТСКГ и ТККГ (см. рис. 1).

Следующим типом стабильности является долговременная, то есть зависимость частоты от времени при длительных интервалах наблюдения.

Как уже упоминалось, в кварцевых генераторах происходят изменения 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 один атомный слой достаточно, чтобы частота отклонилась на $1 \cdot 10^{-6}$. Помимо этого,

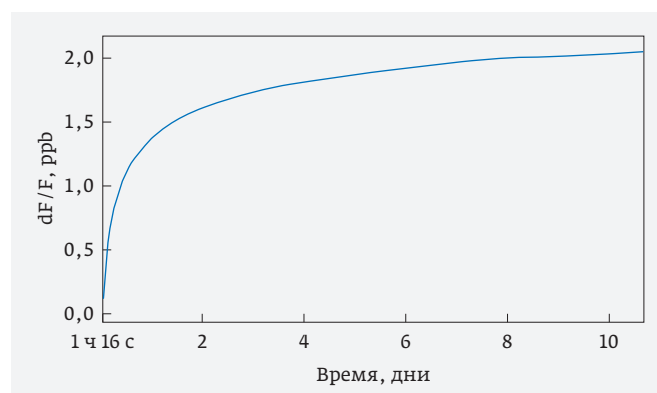


Рис. 2. Типовая зависимость частоты от времени для кварцевых генераторов

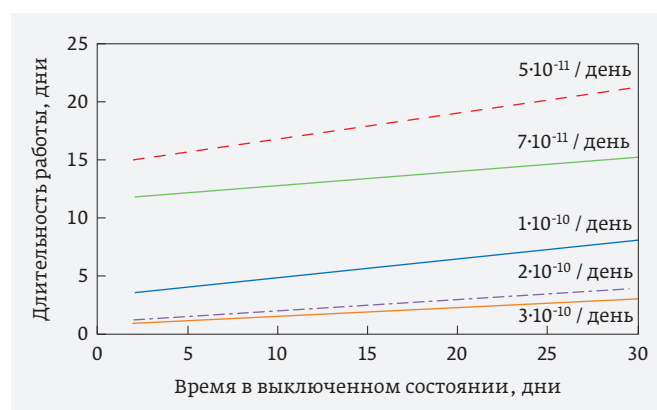


Рис. 3. Зависимость типового времени выхода прецизионных генераторов на разные нормы по суточному старению от времени нахождения в выключенном состоянии

все материалы, используемые в процессе изготовления резонатора, могут незначительно менять свои характеристики, например клей, используемый для приклейки электродов, или сами электроды. Обычно частота кварцевого резонатора изменяется по логарифмическому закону (рис. 2). Направление ее изменения может быть произвольным.

Старение генератора зависит от частоты, так для 10 МГц оно обычно составляет от нескольких единиц 10^{-10} до нескольких единиц 10^{-11} в день. Для 100 МГц примерно на один порядок больше – от единиц 10^{-9} до единиц 10^{-10} . Также оно зависит от того, сколько времени генератор находился во включенном состоянии. Наиболее часто в спецификациях на кварцевые генераторы указывается величина старения через 30 суток после включения. Если генератор выключается в процессе работы, ему снова требуется время, чтобы выйти на какой-то уровень старения. Так, например, на рис. 3 показаны типовые

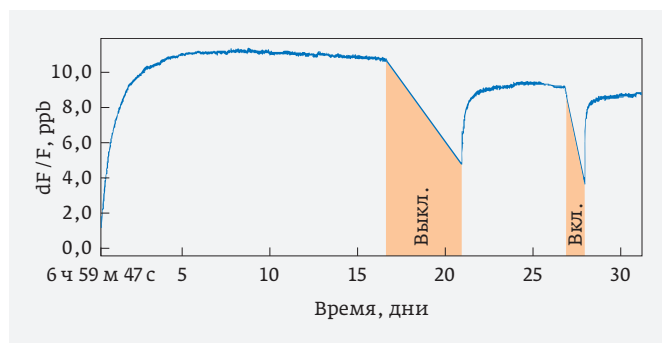


Рис. 4. Влияние выключения питания на частоту кварцевых генераторов

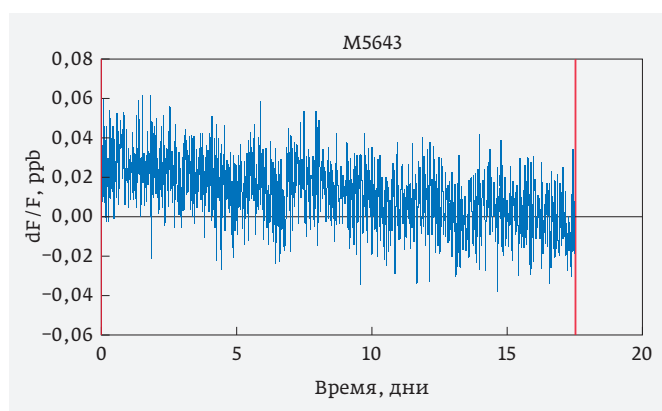


Рис. 5. Типовая зависимость частоты от времени для рубидиевых генераторов

графики выхода прецизионных генераторов на 10 МГц на разные уровни стабильности в зависимости от длительности выключения.

Так, если генератор показывал старение $5 \cdot 10^{-11}$ за сутки и был выключен на 5 суток, ему потребуется проработать 16 дней (см. рис. 3), чтобы снова выйти на уровень $5 \cdot 10^{-11}$. Поэтому всегда желательно обеспечивать постоянный режим работы кварцевого генератора в аппаратуре.

При выключении и последующем включении первоначальный выбег частоты повторяется в каких-то пропорциях. Также при выключении/включении может наблюдаться ретрейс, сдвиг частоты до $5 \cdot 10^{-9}$.

На рис. 4 показано характерное изменение частоты кварцевого генератора с двумя интервалами, на которых питание было отключено.

В рубидиевом генераторе гораздо меньше компонентов, изменяющих свои свойства со временем. В процессе работы состав и давление компонентов наполнения оптических элементов медленно изменяются (диффузия внутри стенок ячеек, натекание газов извне и т.п.), что приводит (в том числе за счет изменения фильтрации излучения и через световой сдвиг) к сдвигу частоты эталонного перехода. Значения данных параметров могут

изменяться под влиянием изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления, что также приводит к периодическим уходам частоты эталонного перехода. В результате проявления описанных выше процессов в зависимости от конкретной модификации прибора может происходить относительное систематическое изменение частоты выходного сигнала. Но этот систематический дрейф довольно мал по сравнению со старением кварцевого генератора. Это позволяет говорить об очень малой долговременной нестабильности и, что не мало важно, очень быстром выходе на нее.

Типовая картина долговременной прописи частоты для рубидиевого генератора показана на рис. 5.

Обратите внимание, что представленный на рис. 5 график довольно шумный. Это следствие его относительно низкой стабильности на «коротких» временах, в частности за 1 с. Кратковременная стабильность зависит в первую очередь от электрических шумов 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, а в частотной – чаще всего выражается однополосным фазовым шумом $L(f)$.

Девиация Аллана, она же среднеквадратичное двухвыборочное отклонение (СКДО), вычисляется следующим образом:

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

где M – количество усреднений, y – отсчеты частоты, усредненные за время τ .

Для прецизионных кварцевых генераторов СКДО может достигать $7 \cdot 10^{-14}$ и даже меньше при времени усреднения, равном 1 с. С увеличением времени усреднения все больше начинает сказываться старение и СКДО идет вверх. Для качественной оценки на длительных интервалах усреднения кварцевый генератор должен быть непрерывно включен в течение длительного времени, для выхода величины старения «на полку». Характерная кривая показана на рис. 6

Рубидиевые генераторы обладают большим значением СКДО на малых временах усреднения (10^{-11} на 1 с), но при этом с увеличением времени это значение уменьшается.

Однополосный фазовый шум 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 частоты в полосе 1 Гц). Спектральная плотность мощности является непрерывной функцией отстройки по частоте и представляется в виде графика. На рис. 7

показан график фазовых шумов для ультрапрецизионного кварцевого генератора.

ВРЕМЕННАЯ ОШИБКА

При использовании в телекоммуникационных системах чаще всего применяют интегральный показатель нестабильности – временную ошибку. Он показывает отклонение времени в режиме удержания (Holdover) и выражается в долях секунды за некоторый интервал времени (1 мкс за 24 ч, 3 мкс за 72 ч, 500 нс за 12 ч и т.п.).

Наибольший вклад во временную ошибку вносят долговременный уход и реакция на изменение температуры. Рубидиевые генераторы обладают очень малым значением долговременного ухода, а прецизионные кварцевые генераторы могут обладать крайне малой температурной нестабильностью.

Долговременный уход можно примерно выразить линейной функцией, что обычно справедливо на небольших интервалах времени (1...3 суток), с учетом того, что генератор находится во включенном состоянии длительное время к моменту оценки. Это при интегрировании приводит к квадратичной функции временной ошибки (рис. 8).

Влияние температурной стабильности зависит от того, как именно будет меняться температура при эксплуатации и испытаниях аппаратуры. Для примера ниже показаны два профиля с изменением температуры (синий график) в пределах 5 °C в течение суток и временная ошибка (красная пунктирная), которая получается при изменении температуры по этим профилям для генератора с идеальной линейной температурной зависимостью $2 \cdot 10^{-13}$ на 1 °C (рис. 9).

Профиль 1 (слева) абсолютно симметричен в течение суток – максимум временной ошибки при таком профиле ~15 нс, при этом через 24 ч она будет равна нулю. Профиль 2 (справа) не симметричен – максимум временной

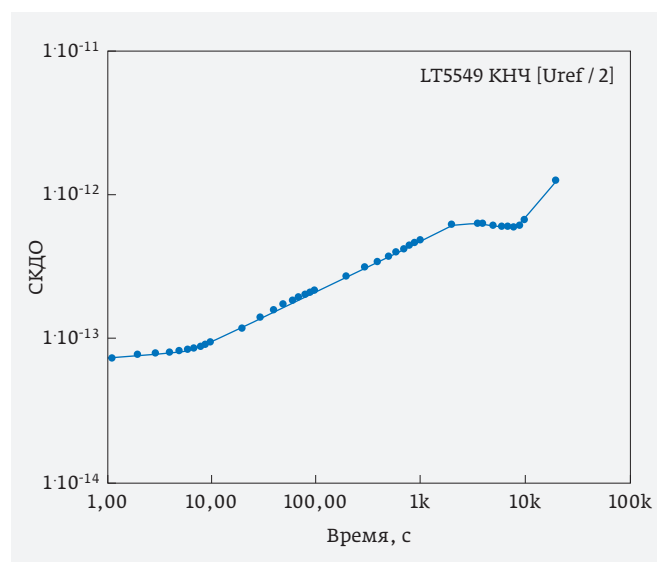


Рис. 6. Девиация Аллана для кварцевого генератора

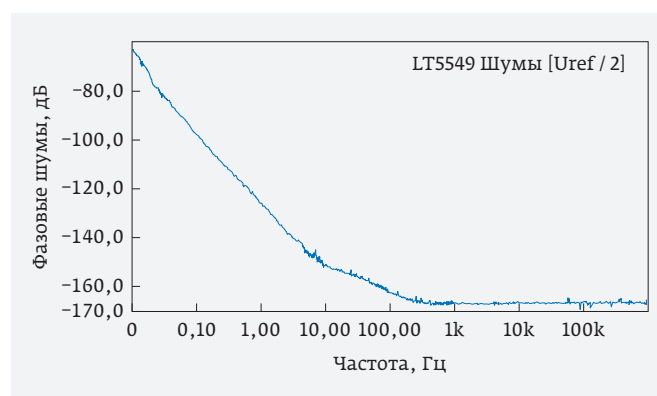


Рис. 7. Относительная спектральная плотность мощности для ультрапрецизионного кварцевого генератора

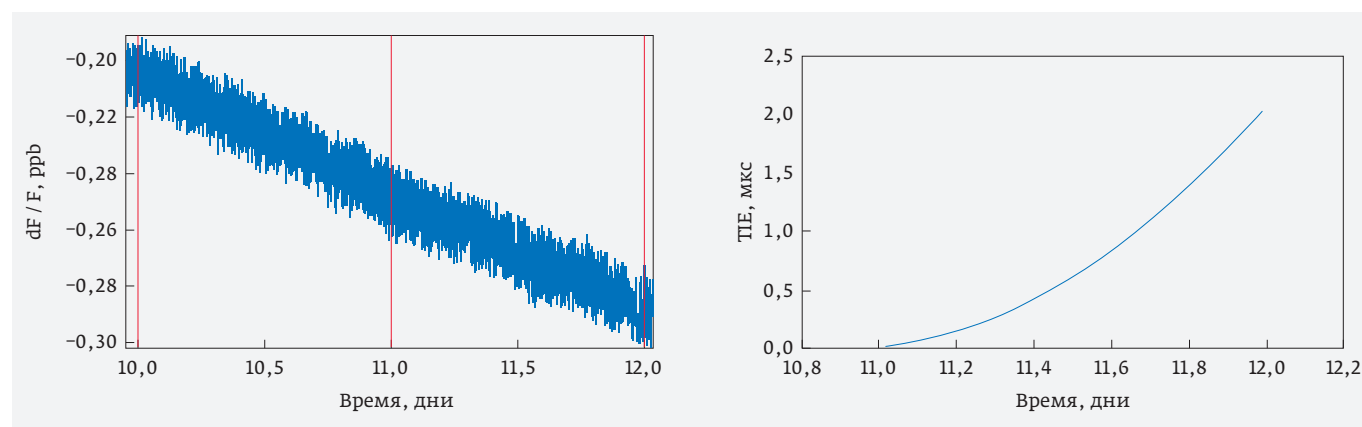


Рис. 8. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа)

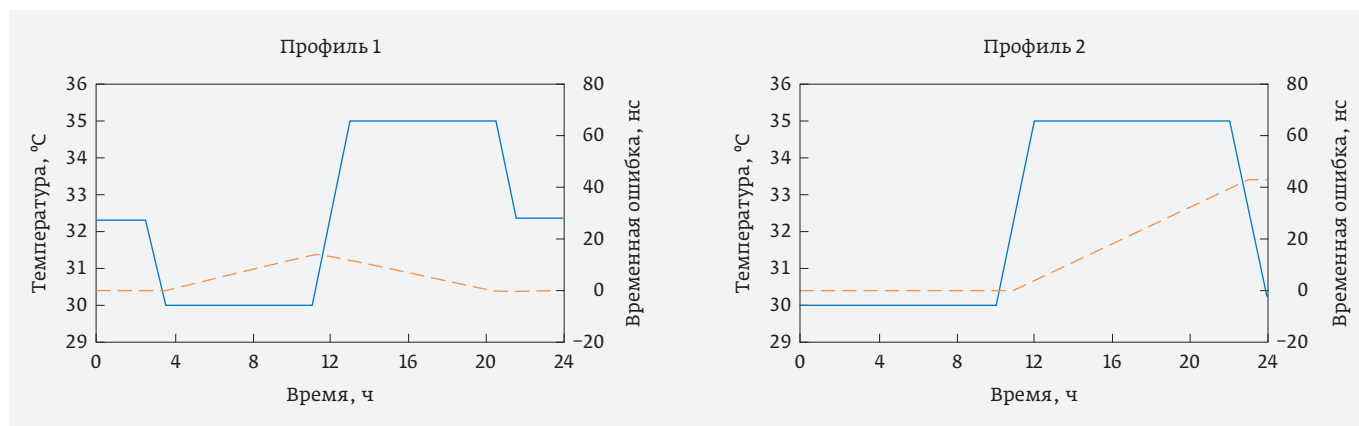


Рис. 9. Влияние температурного профиля на временную ошибку

ошибки ~45 нс. Для оценки временной ошибки мы используем именно его.

Для оценки временной ошибки удобно на данные длительной прописи частоты накладывать скользящее временное окно требуемой длительности. Схематичное изображение оценки временной ошибки представлено ниже (рис. 10).

Для рубидиевых генераторов при постоянной температуре мы получаем примерно такие оценки временной

ошибки за 24 ч (рис. 11). Результаты вписываются в очень жесткие рамки 100...150 нс за 24 ч. Но в условиях небольших изменений температуры ($\pm 5^\circ\text{C}$) видна четкая зависимость от изменений температуры и итоговый результат уже увеличивается до 400...600 нс (рис. 12).

Конечно, можно проводить компенсацию рубидиевых генераторов в более узком интервале, что позволит получить лучшие результаты по временной ошибке, но это не всегда приемлемо.

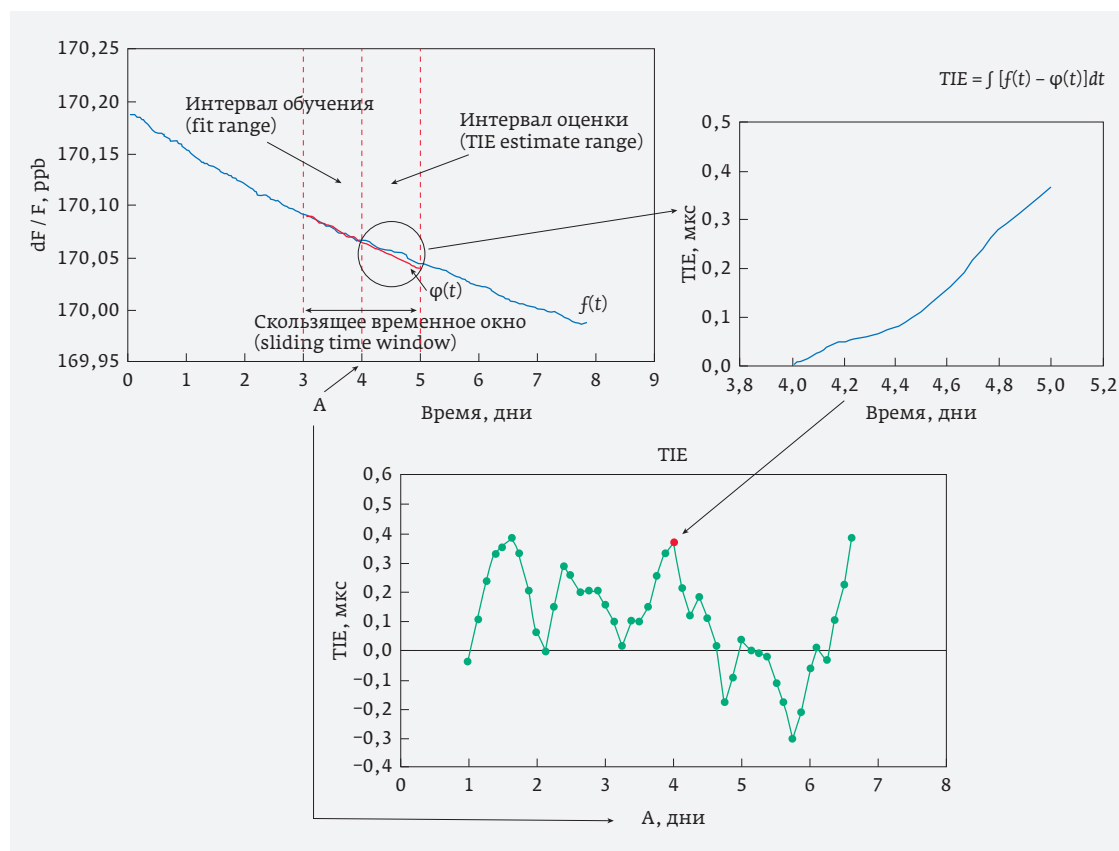


Рис. 10.
Методика
оценки
временной
ошибки

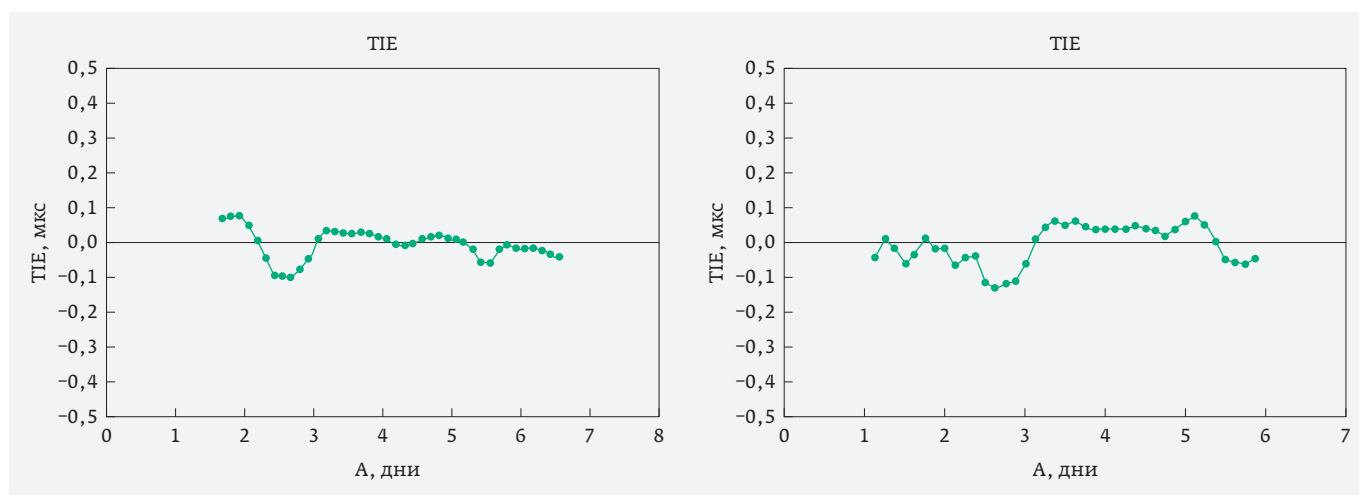


Рис. 11. Временная ошибка рубидиевых генераторов при постоянной температуре

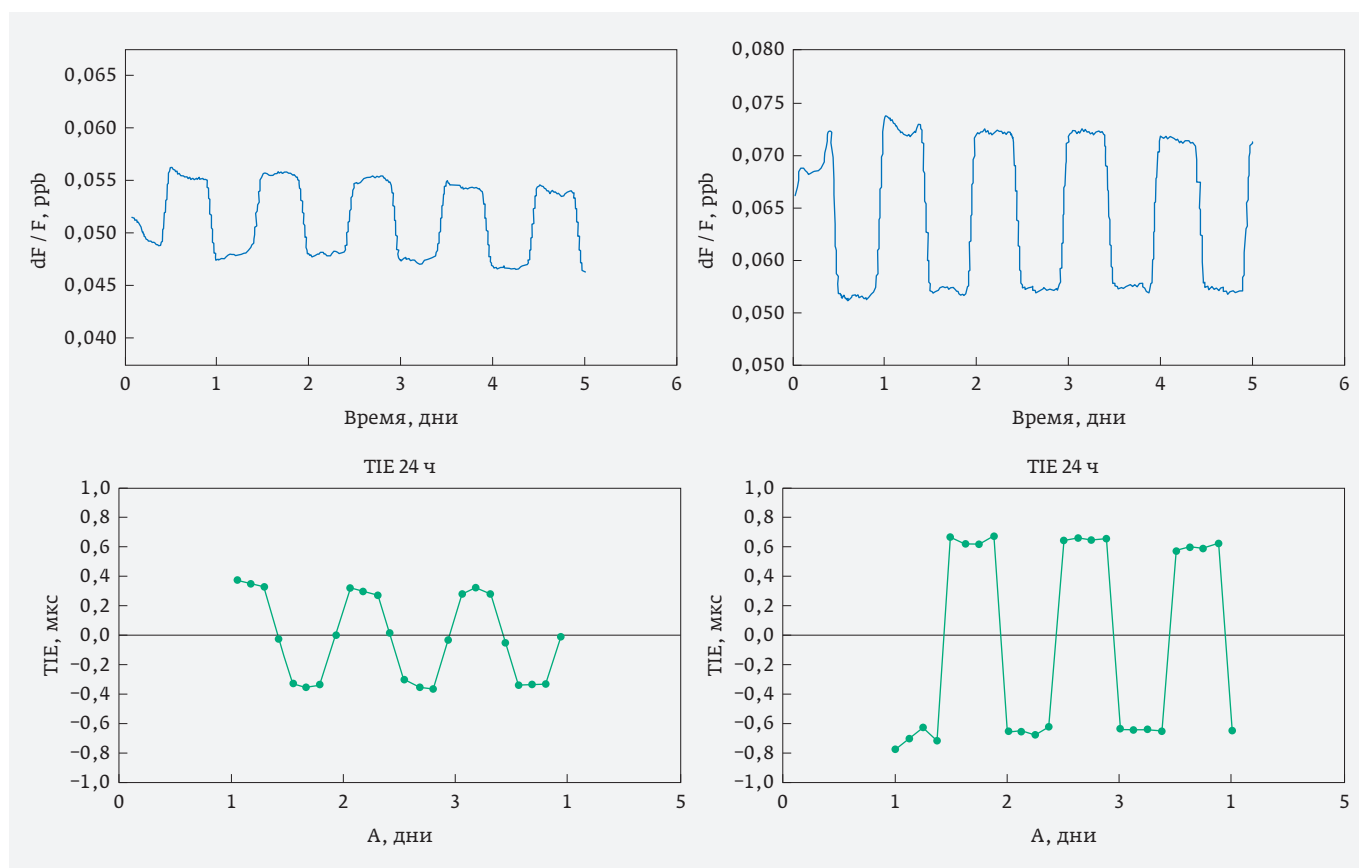


Рис. 12. Временная ошибка рубидиевых генераторов в условиях небольших изменений температуры

С кварцевыми генераторами можно наоборот получить очень хорошую стабильность в интервале, а определяющим временную ошибку станет долговременный уход. Сами по себе кварцевые генераторы показывают временную ошибку 1...2 мкс за 24 ч. Но их долговременный уход довольно хорошо прогнозируется,

и таким образом можно построить систему, компенсирующую старение. Суть подобной компенсации сводится к тому, чтобы по известному ранее поведению частоты генератора предсказать изменение частоты на следующий период. Первый период времени, за который происходит оценка старения генератора, называется периодом

обучения, второй период – период определения временной ошибки. Процесс обучения представляет построение аппроксимирующей модели дрейфа частоты, которая

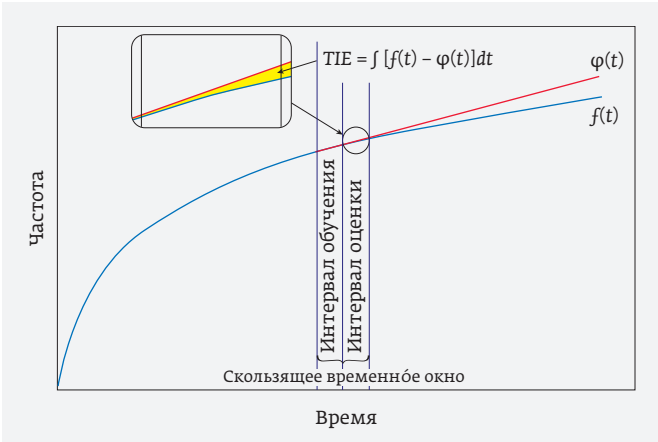


Рис. 13. Компенсация старения кварцевых генераторов

позволит предсказать дрейф частоты генератора в последующий период времени. В итоге временная ошибка будет определяться уже разницей между прогнозируемым и реальным старением.

В качестве аппроксимирующей модели можно использовать линейную функцию аппроксимации. Однако при этом следует иметь в виду, что в первые дни после длительного выключения ошибка прогнозирования линейной аппроксимацией будет чрезмерно высока.

Использование такой компенсации позволяет уменьшить временную ошибку, вносимую старением КГ, в три-пять раз. Таким образом, временная ошибка при использовании подобной компенсации может быть менее 400 нс за 24 ч. Для примера на рис. 14 представлен график временной ошибки для прописи частоты, показанной ранее на рис. 10, только уже с учетом линейной компенсации старения.

Используя такой подход, можно получить временную ошибку на уровне 400 нс за 24 ч в условиях небольшого изменения температуры (рис. 15).

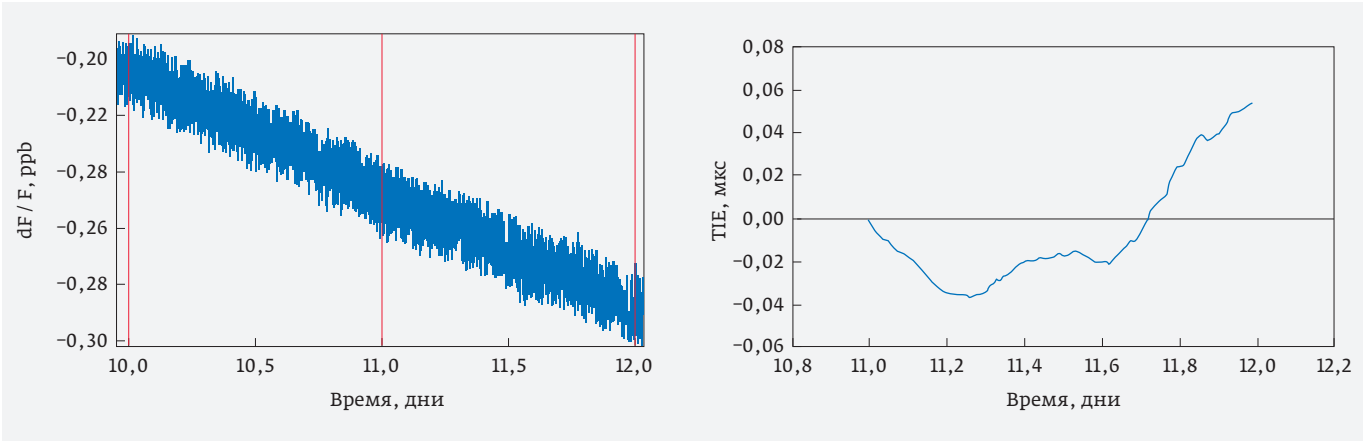


Рис. 14. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа) с учетом линейной компенсации старения

Таблица 1. Сравнение характеристик рубидиевого генератора RFS-M102 и кварцевого генератора (ГК360-ТС)

Параметры	RFS-M102	ГК360-ТС
Габаритные размеры	51×51×26 мм	51×51×19 мм
Временная ошибка	100 нс при постоянной температуре 400 нс при переменной температуре (±5 °С)	400 нс при постоянной температуре 400 нс при переменной температуре (±5 °С), с учетом компенсации старения
Температурная стабильность	±5·10 ⁻¹¹ в интервале -40...75 °С	±1·10 ⁻¹¹ в интервале -40...85 °С
Долговременная стабильность	2·10 ⁻¹¹ /сутки	1·10 ⁻¹⁰ /сутки
Потребление	до 1,66 А при включении, до 0,5 А в установившемся режиме	до 2 А при включении, до 0,6 А в установившемся режиме
Девияция Аллана на 1 с	2·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹²

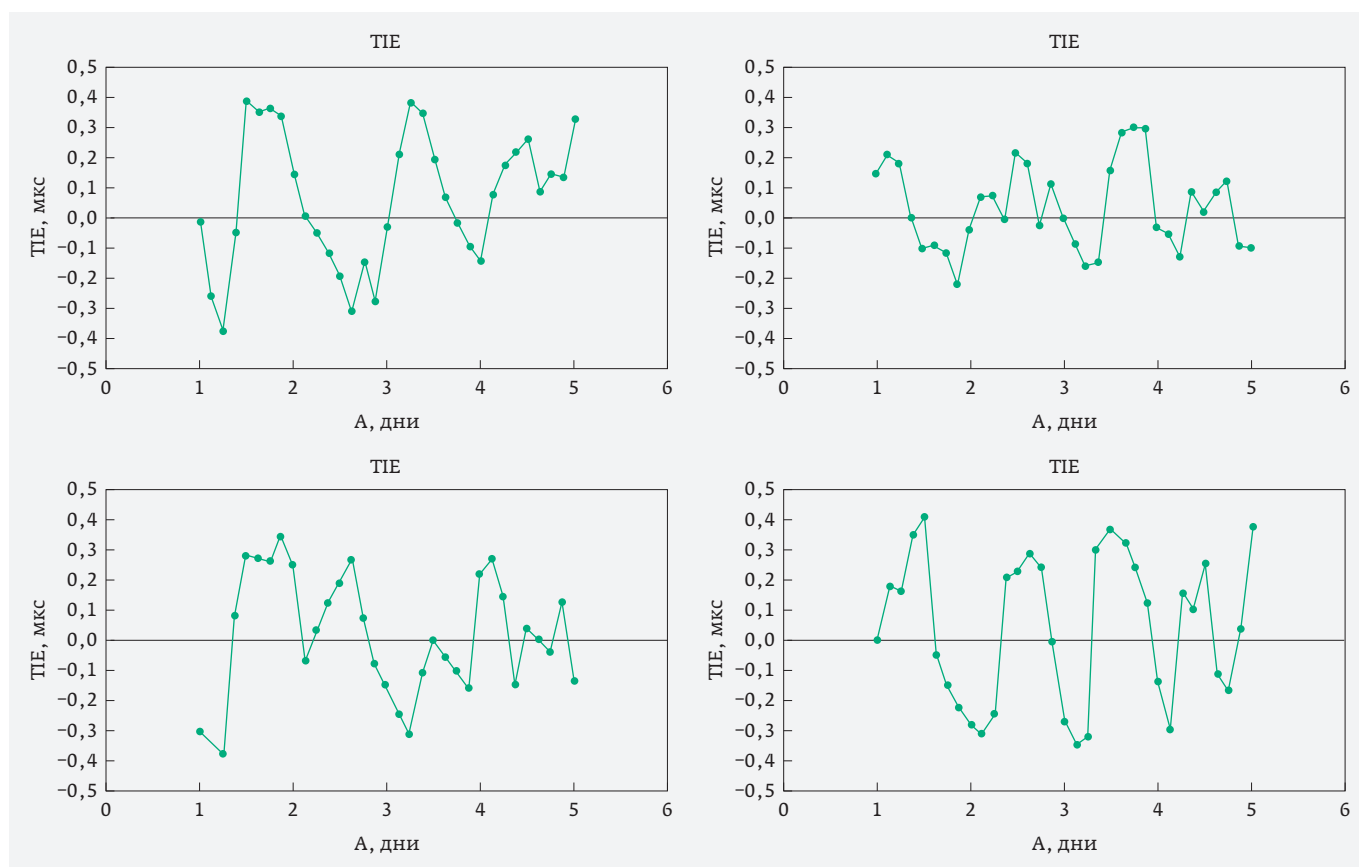


Рис. 15. Временная ошибка для четырех различных генераторов

Для кварцевых генераторов, использование которых предполагает компенсацию дрейфа частоты, мы накладываем дополнительные требования по обеспечению монотонности этого дрейфа. Это достигается специальными мерами при производстве резонаторов и конструкции самих генераторов. Для таких генераторов вводится дополнительный параметр контроля – значение временной ошибки при компенсации дрейфа частоты (рис. 15). При оценке дрейфа частоты используется алгоритм, схожий с компенсацией старения, описанной выше. Он позволяет оценить прогнозируемость и возможность компенсации старения генератора.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРЦЕВОГО И РУБИДИЕВОГО ГЕНЕРАТОРОВ

Для дальнейшего сравнения будут использованы рубидиевый генератор RFS-M102 и прецизионный кварцевый генератор ГК360-ТС производства АО «Морион». Их основные параметры сведены в табл. 1.

Как видно, оба генератора очень похожи друг на друга по габаритам и потреблению. При этом показывают временную ошибку до 400 нс в условиях переменной температуры. Для кварцевого ГК360 стоит иметь

в виду, что нужно обеспечить компенсацию старения генератора в аппаратуре, но и его температурная стабильность позволит получать такую ошибку в более широком окне. Перестройка у обоих генераторов может быть как аналоговой, так и цифровой. При правильном использовании и тот и другой тип генераторов позволяет добиться очень хороших результатов по требованиям временной ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kotyukov A., Ivanov Y., Nikonov A.** Precise Frequency Sources Meeting the 5G Holdover Time Interval Error Requirement // Microwave journal. May 2018.
2. **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.
3. **Иванов Ю.А., Никонов А.Г., Котюков А.В.** Использование прецизионных генераторов в аппаратуре стандарта 5G // Современная Электроника. 2019. №3. С. 52–55.