

Современные кварцевые и рубидиевые генераторы

Юрий Иванов (компания МОРИОН)

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 стабильности могут быть вполне сопоставимы в конечном итоге. Для начала давайте немного разберёмся в их внутреннем устройстве.

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 становится возможно связать с электрической схемой. В результате чего получается автогенератор. Кварцевый резонатор – высокостабильный компонент, однако с ужесточением требований, предъявляемых к стабильности частоты, становится 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 фотоприёмником с другой стороны камеры. При этом на камеру подаётся 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

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

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

Давайте посмотрим влияние некоторых внешних факторов на стабильность частоты для этих типов генераторов. Начнём с температурной стабильности.

Частота кварцевого резонатора даже с учётом применения специальных срезов (например, АТ) 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 это изменение частоты – термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ, ТСХО). Либо же содержать в себе термостат, поддерживающий постоянную температуру, внутрь которого размещают резонатор и другие чувствительные к изменению температуры элементы – 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 на рабочий режим. В самых прецизионных генераторах применяется двойное термостатирование, что влечёт за собой увеличение их габаритов и потребления, зато на выходе получается практически нивелировать влияние температуры. При испытаниях таких генераторов приходится уже устранять влияние старения резонатора (о чём пойдёт речь ниже), проводя несколько циклов и вычитая линейный дрейф. На рис. 1 представлены типовые графики температурной стабильности в интервале температур.

стабильности рубидиевой ячейки также сильно зависит от изменения температуры. Для уменьшения влияния применяется термокомпенсация, что позволяет достичь единиц 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 вполне можно получить полное изменение частоты в рамках нормы во всём интервале. Для наглядности можно сравнить графики ТСКГ и ТККГ на рис. 1.

Следующим типом стабильности является долговременная, т.е. зависимость частоты 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 –

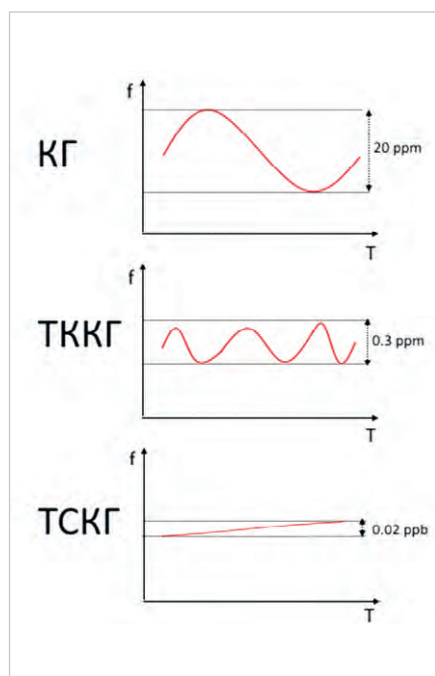


Рис. 1. Зависимость частоты от температуры для разных видов кварцевых генераторов.

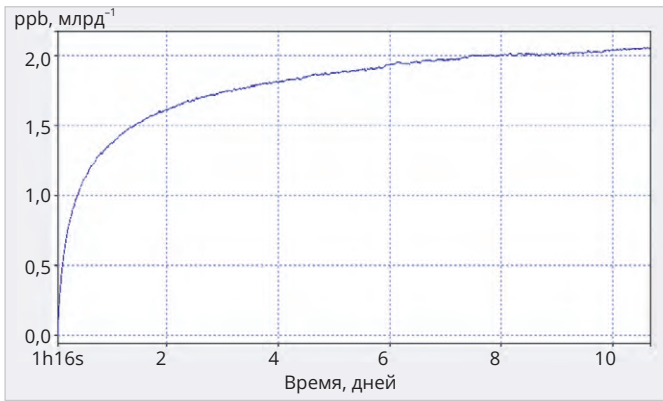


Рис. 2. Типовая зависимость частоты от времени для кварцевых генераторов

основной причиной старения является небольшое изменение толщины в связи с процессами абсорбции и десорбции. Кварцевая пластина содержит примерно 1 млн атомных слоёв, изменения толщины даже на 1 атомный слой достаточно, чтобы частота отклонилась на 1×10^{-6} . Помимо этого, все материалы, используемые в процессе изготовления резонатора, могут немного менять свои характеристики, например, клей, используемый для приклейки электродов, или сами электроды. Обычно частота кварцевого

резонатора изменяется по логарифмическому закону (рис. 2). Направление её 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 1 порядок больше – от единиц 10^{-9} до единиц 10^{-10} . Также оно зависит от того, сколько генератор находился во включённом состоянии. Наиболее часто в спецификациях на кварцевые генераторы ука-

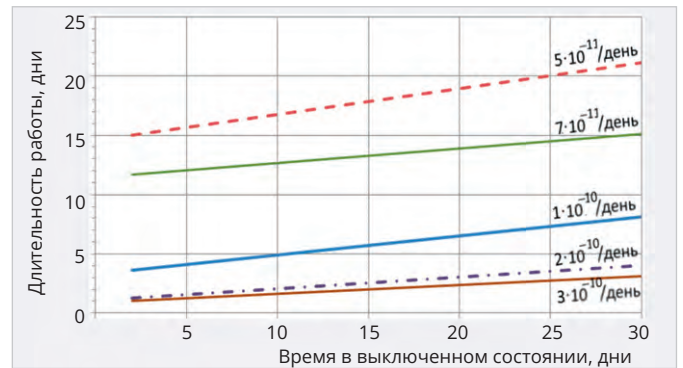


Рис. 3. Типовое время выхода прецизионных генераторов на разные нормы по суточному старению от времени в выключенном состоянии

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

Так, если генератор показывал старение 5×10^{-11} за сутки и был выключен на 5 суток, ему потребуется проработать 16 дней, чтобы снова выйти

КВАРЦЕВЫЕ И РУБИДИЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ



МОРИОН



RFS-M102



ГК360-TC

ГАБАРИТЫ	51x51x26 мм	51x51x19 мм
ВРЕМЕННАЯ ОШИБКА		
ПРИ ПОСТ. t°	100 нс	400 нс
ПРИ ПЕРЕМЕН. t° ($\pm 5^{\circ}C$)	400 нс	400 нс (С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ СТАРЕНИЯ)
ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ	$\pm 5 \times 10^{-11}$ ПРИ $-40...+75^{\circ}C$	$\pm 1 \times 10^{-11}$ ПРИ $-40...+85^{\circ}C$
ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ	2×10^{-11} /СУТКИ	1×10^{-10} /СУТКИ
ПОТРЕБЛЕНИЕ		
ПРИ ВКЛ.	до 1,66 А	до 2 А
В УСТ. РЕЖИМЕ	до 0,5 А	до 0,6 А
ДЕВИАЦИЯ АЛЛАНА НА 1 с	2×10^{-11}	1×10^{-12}

КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ •
 ФИЛЬТРЫ •
 РЕЗОНАТОРЫ •
 КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ •
 РУБИДИЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО •
 ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ПР. КИМА 13А, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 199155
WWW.MORION.COM.RU

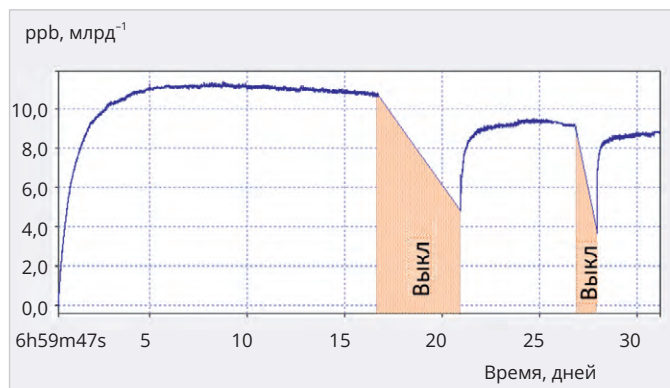


Рис. 4. Влияние выключения питания на частоту кварцевых генераторов

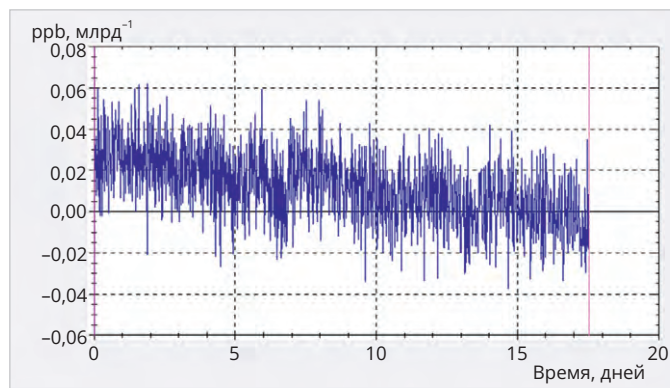


Рис. 5. Типовая зависимость частоты от времени для рубидиевых генераторов

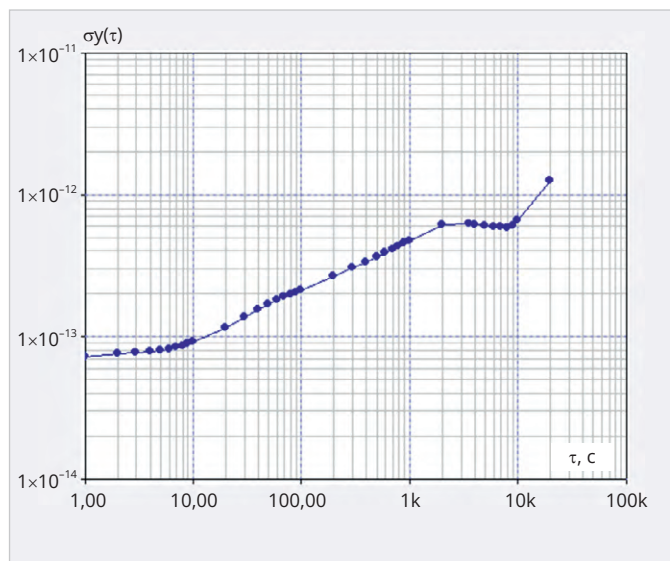


Рис. 6. Девиация Аллана для кварцевого генератора

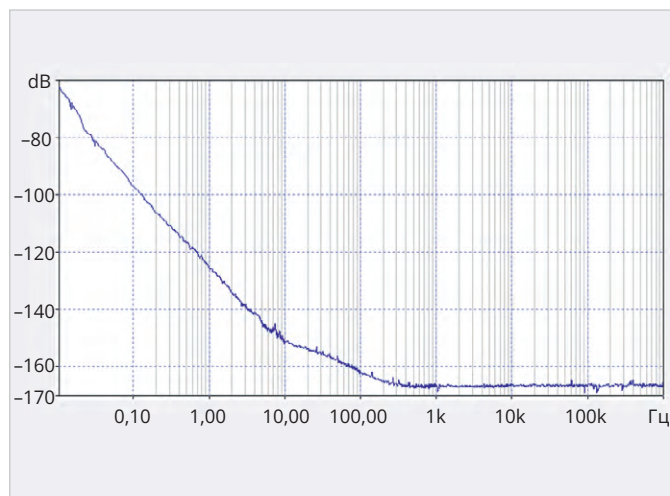


Рис. 7. Относительная спектральная плотность мощности фазовых шумов для ультрапрецизионного кварцевого генератора

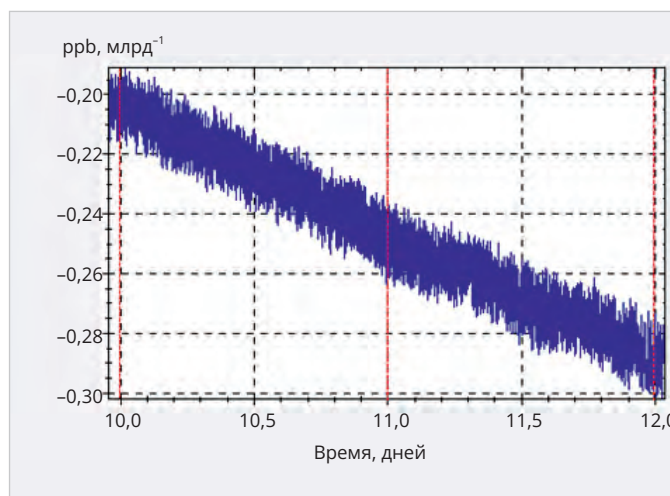
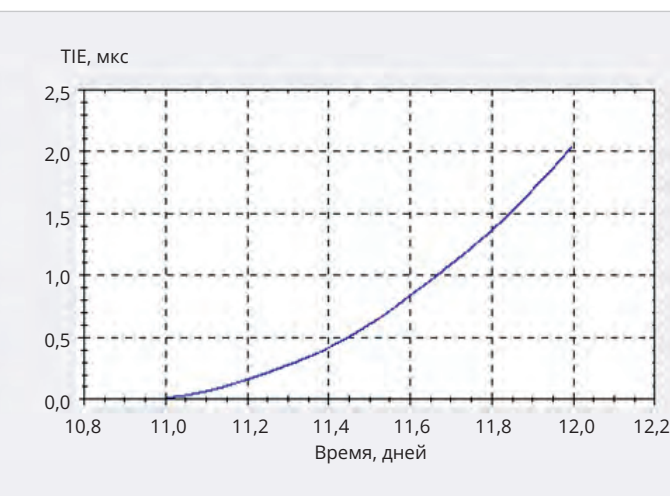


Рис. 8. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа)



на уровень 5×10^{-11} . Поэтому всегда желательно обеспечивать постоянный режим работы кварцевого генератора в аппаратуре.

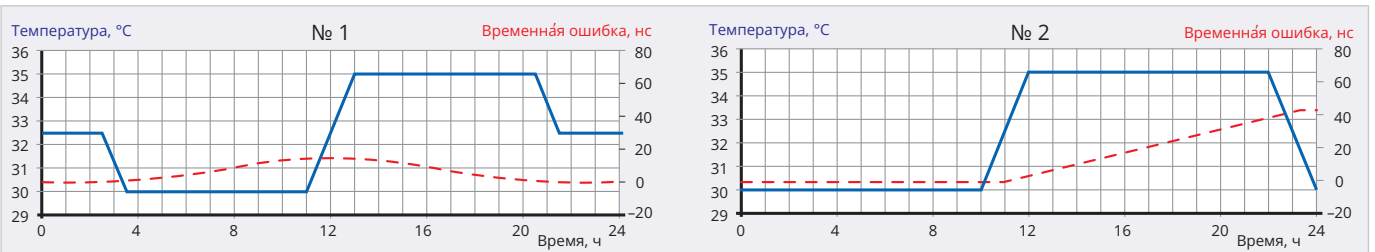
При выключении и последующем включении первоначальный выбег частоты повторяется в каких-то пропорциях. Также при выключе-

нии/включении может наблюдаться ретрейс, сдвиг частоты до 5×10^{-9} .

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

В рубидиевом генераторе гораздо меньше компонентов, изменя-

ющих 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 счёт изменения фильтрации излучения и через световой сдвиг) к



Примечание: Профиль 1 (слева) абсолютно симметричен в течение суток – максимум временной ошибки при таком профиле ~15 нс, при этом через 24 часа она равна 0. Профиль 2 (справа) несимметричен – максимум временной ошибки ~45 нс. Для оценки временной ошибки мы используем именно его

Рис. 9. Влияние температурного профиля на временную ошибку

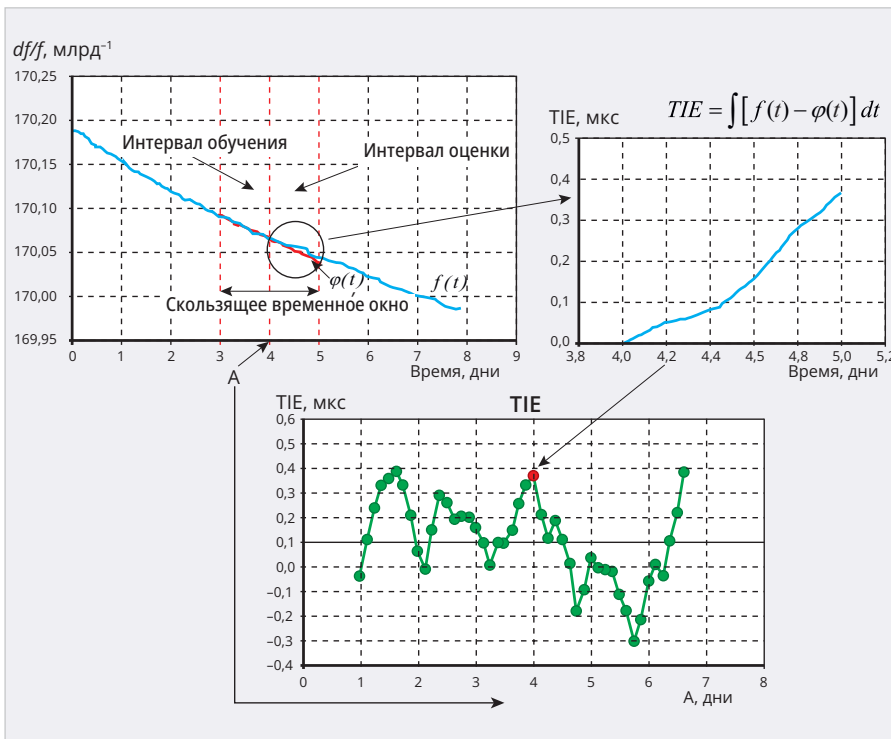


Рис. 10. Методика оценки временной ошибки

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 проис-

ходить 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 немаловажно, очень быстром выходе на неё.

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. Её 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 средне-квадратичное двухвыборочное отклонение (СКДО), вычисляется следующим образом:

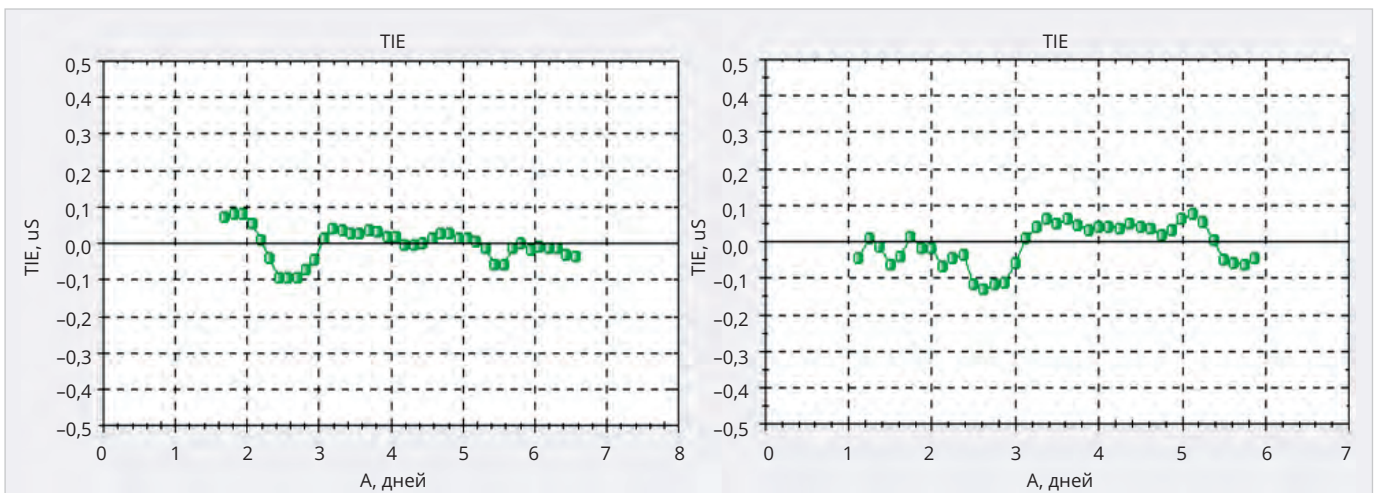


Рис. 11. Временная ошибка двух рубидиевых генераторов при постоянной температуре

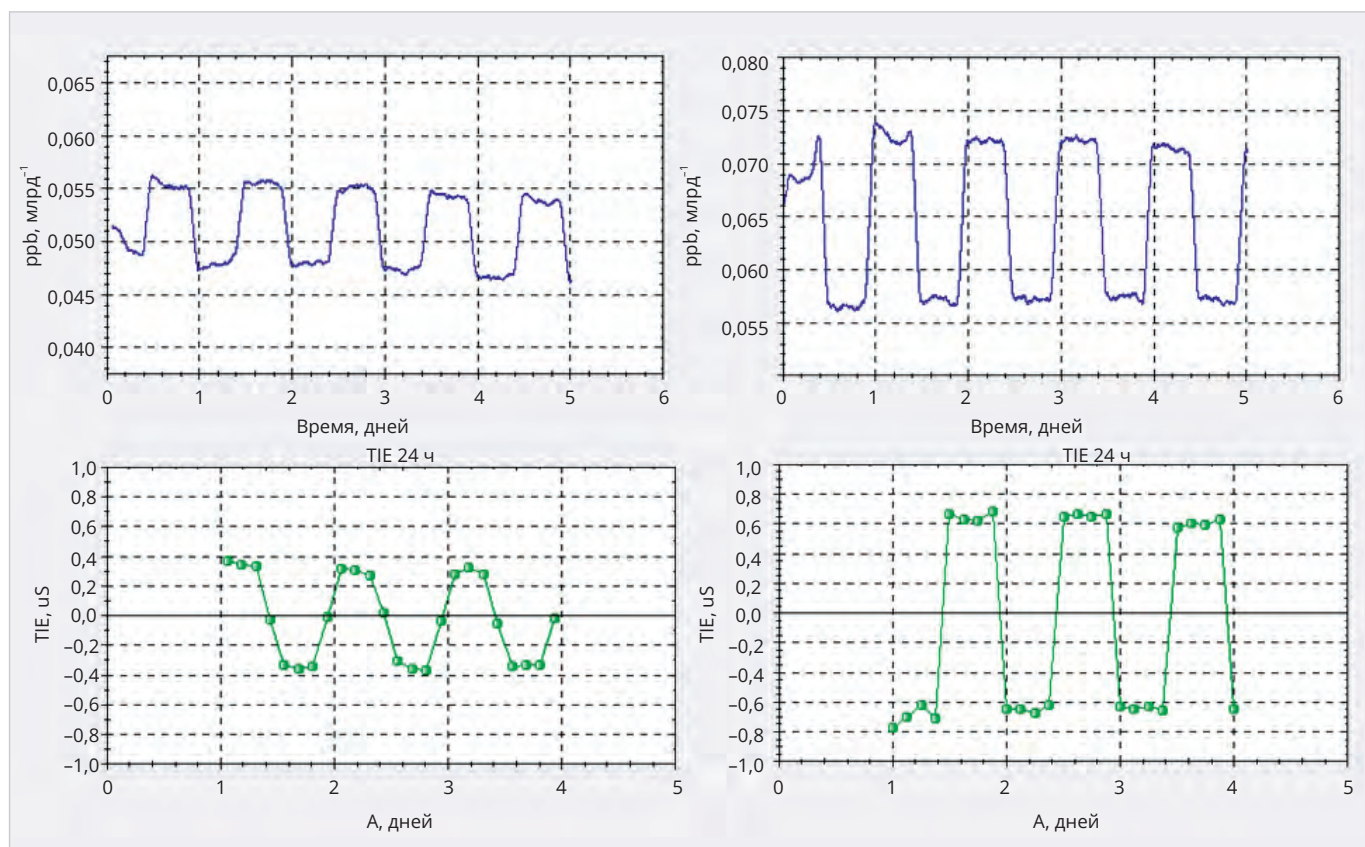


Рис. 12. Временная ошибка двух рубидиевых генераторов в условиях небольших (+/- 5°C) изменений температуры

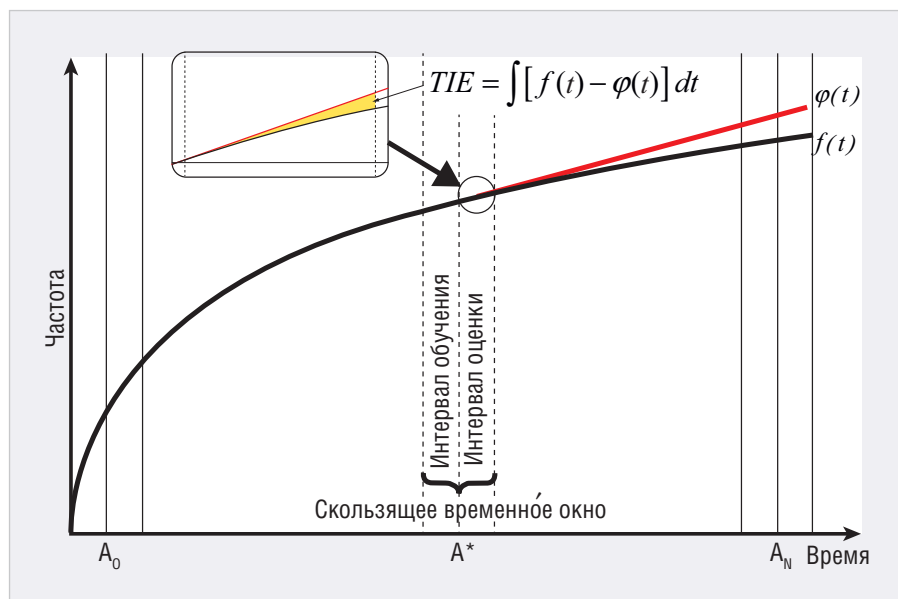


Рис. 13. Компенсация старения кварцевых генераторов

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

где M – количество усреднений, y – отсчёты частоты, усреднённые за время τ .

Для прецизионных кварцевых генераторов СКДО может достигать 7×10^{-14} и даже меньше при времени усреднения, равном 1 с. С увеличением времени усреднения всё больше начинает сказываться старение, и СКДО идёт вверх. Для качественной оценки на длительных интервалах усред-

нения кварцевый генератор должен быть непрерывно включён в течение длительного времени для выхода его 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 спектраль-

ной плотности мощности, измеренной на определённой 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.

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 секунд за некоторый интервал времени (1 мкс за 24 часа, 3 мкс за 72 часа, 500 нс за 12 часов и т.п.).

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

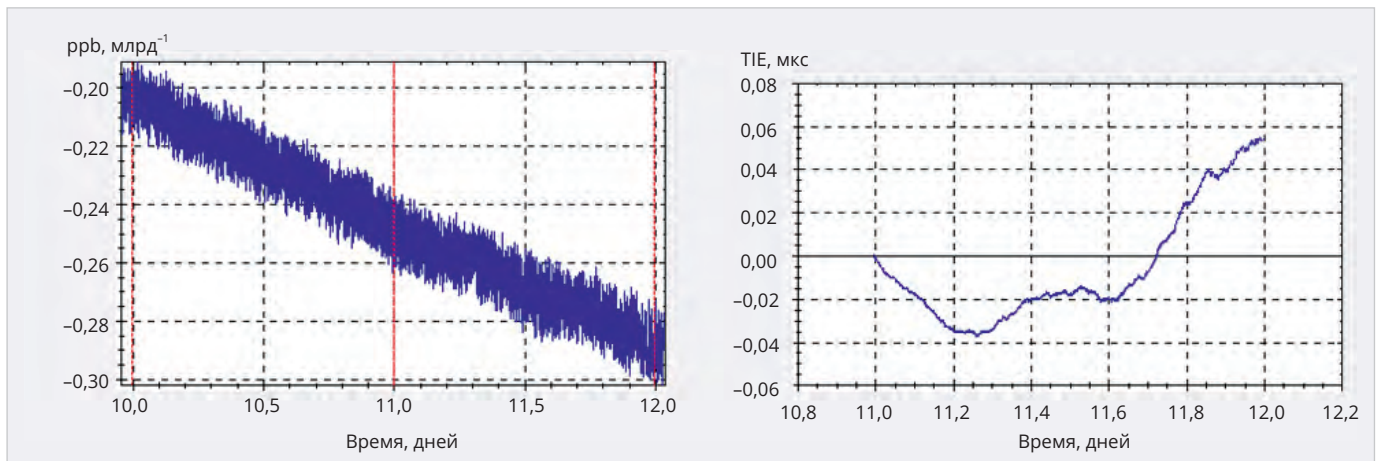


Рис. 14. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа) с учётом линейной компенсации старения

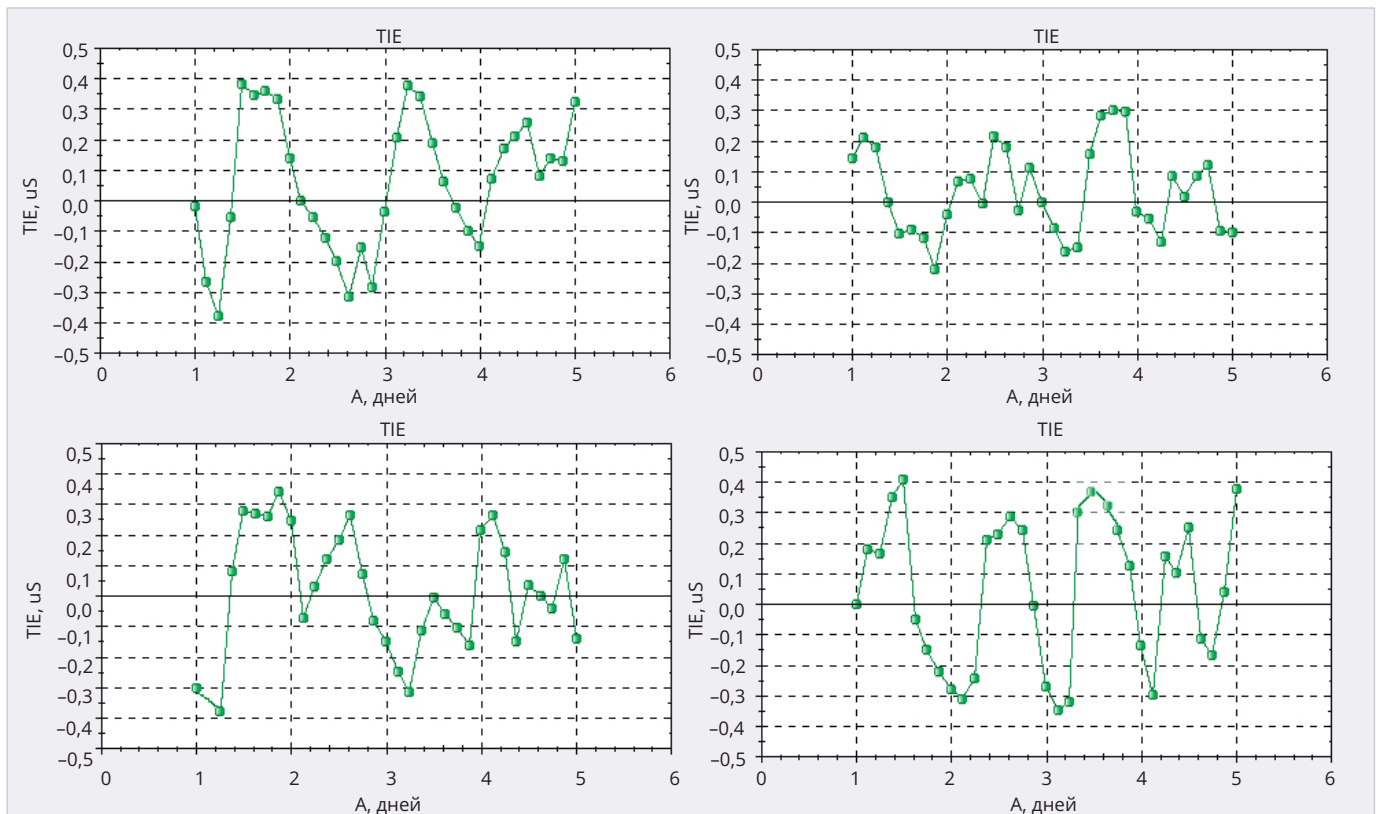


Рис. 15. Временная ошибка для 4 различных генераторов

Долговременный уход можно примерно выразить линейной функцией, что обычно справедливо на небольших временах (1...3 суток), с учётом того, что генератор находится во включённом состоянии длительное время к моменту оценки, что 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 на рис. 9 показаны 2 профиля с изменением температуры в пределах 5°C в течение суток и временная ошибка, которая получается при изменении температуры по

этим профилям для генератора с идеальной линейной температурной зависимостью 2×10^{-13} на 1°C.

Профиль 1 (слева) абсолютно симметричен в течение суток – максимум временной ошибки при таком профиле ~15 нс, при этом через 24 часа она равна 0. Профиль 2 (справа) несимметричен – максимум временной 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 на рис. 10.

Так, для рубидиевых генераторов при постоянной температуре мы получаем примерно такие оценки временной ошибки за 24 часа (рис. 11).

Результаты вписываются в очень жёсткие рамки 100...150 нс за 24 часа. Но если эти же генераторы измерить в условиях небольших изменений температуры ($\pm 5^\circ\text{C}$), то становится видна чёткая 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 получать лучшие результаты по временной ошибке, но это не всегда приемлемо.

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

	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°C)	400 нс при постоянной температуре 400 нс при переменной температуре (±5°C) с учётом компенсации старения
Температурная стабильность	±5×10 ⁻¹¹ в интервале -40...+75°C	±1×10 ⁻¹¹ в интервале -40...+85°C
Долговременная стабильность	2×10 ⁻¹¹ / сутки	1×10 ⁻¹⁰ / сутки
Потребление	До 1,66 А при вкл., до 0,5 А в уст. режиме	До 2 А при вкл., до 0,6 А в уст. режиме
Девияция Аллана на 1 с	2×10 ⁻¹¹	1×10 ⁻¹²

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 часа. Но их долговременный уход довольно хорошо прогнозируется, 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 собой построение аппроксимирующей модели дрейфа частоты, которая позволит предсказать дрейф частоты генератора в последующий период времени. В итоге временная ошибка будет определяться уже разницей между прогнозируемым и реальным старением (рис. 13).

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 линей-

ной аппроксимацией будет чрезмерно высока.

Использование такой компенсации позволяет уменьшить временную ошибку, вносимую старением КГ в 3...5 раз. Таким образом, временная ошибка при использовании подобной компенсации может быть менее 400 нс за 24 часа. Для примера на рис. 14 представлен график временной ошибки для прописи частоты, показанной ранее на рис. 10, только уже с учётом линейной компенсации старения.

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

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 них вводится дополнительный параметр контроля – значение временной ошибки при компенсации дрейфа частоты, при оценке которого мы используем алгоритм, схожий с компенсацией старения, описанной выше. Он позволяет оценить прогнозируемость и возмож-

ность 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 оба готовы показывать временную ошибку до 400 нс в условиях переменной температуры. Для кварцевого ГК360 стоит учесть необходимость обеспечения компенсации старения генератора в аппаратуре, чтобы его температурная стабильность позволила 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, 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.



НОВОСТИ МИРА

Cisco ликвидировала своё юрлицо в России

Производитель сетевого оборудования и программного обеспечения Cisco завершил процесс ликвидации одного из своих юридических лиц в России.

Согласно информации, опубликованной в Едином госреестре юридических лиц,

ликвидация юридического лица Cisco состоялась 15 декабря.

Речь идёт об ООО «Сиско системс», которое было ответственно за обслуживаемое оборудование. Важно отметить, что второе юридическое лицо компании, «Сиско солюшенз», продолжает свою деятельность в России.

Ранее сообщалось, что производитель сетевого оборудования и программных продуктов компания Cisco Systems в январе этого года «физически уничтожила» свои материально-производственные запасы в России на сумму 1,86 млрд рублей.

ixbt.com