

Использование прецизионных генераторов в аппаратуре стандарта 5G

Юрий Иванов, Аркадий Никонов,
Александр Котюков (morion@morion.com.ru)

Кварцевые генераторы очень часто используются в телекоммуникационных системах в качестве хранителей шкалы времени. В статье приведены методики оценки временной ошибки и представлены результаты испытаний новейших высокостабильных кварцевых и рубидиевых генераторов для работы в условиях жёстких требований, налагаемых стандартом 5G.

Для работы телекоммуникационных систем необходимо обеспечить их надёжную синхронизацию. В основном она обеспечивается высокостабильным временным сигналом от атомных часов, поступающим от глобальной спутниковой сети или с помощью серверов точного времени. Однако при работе такой системы могут возникать сбои, связанные с потерей опорного сигнала. Для таких случаев в подобных системах предусмотрены внутренние источники точного времени, например прецизионные кварцевые (КГ) или рубидиевые генераторы.

Стабильность их частоты (и, соответственно, времени) ниже, чем стабильность частоты атомных часов. В итоге при таком режиме работы системы возникает временная ошибка TIE (Time Interval Error):

$$TIE = T_{ref} - T_{int}$$

где T_{ref} – показания точного времени, T_{int} – показания времени КГ или рубидиевого генератора.

Пятое поколение мобильной связи 5G, разрабатываемое в данный момент, налагает очень жёсткие требования по временной ошибке. Так,

для опорных устройств сети (первичных часов) временная ошибка должна быть на уровне 400...100 нс за 24 ч [1].

Основными источниками временной ошибки при использовании прецизионных кварцевых и рубидиевых генераторов являются долговременная и температурная нестабильности частоты.

Долговременная нестабильность частоты современных прецизионных КГ составляет $2...7 \times 10^{-11}$ за сутки, что приводит к временной ошибке 0,9...3,0 мкс за сутки. При этом она сильно зависит от времени непрерывной работы генератора после включения. Для рубидиевых генераторов величина долговременной нестабильности частоты составляет $0,2...2 \times 10^{-11}$ за сутки (0,1...0,9 мкс).

Как видно, только из-за эффекта старения кварцевые генераторы сами по себе не могут обеспечить столь строгие требования по временной ошибке. Однако для её уменьшения можно использовать компенсацию ухода частоты генератора во времени. Суть подобной компенсации сводится к тому, чтобы по известному ранее поведению частоты генератора предсказать изменение частоты на следующий период. Первый период вре-

мени, 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 (см. рис. 1) [3].

В качестве аппроксимирующей модели можно использовать линейную функцию. Однако при этом следует иметь в виду, что в первые дни после длительного выключения ошибка прогнозирования линейной аппроксимацией будет чрезмерно высокой. На рисунке 1 представлена типовая характеристика старения КГ, после длительного выключения. Использование такой компенсации позволяет уменьшить временную ошибку, вносимую старением КГ, в 3–5 раз. Таким образом, временная ошибка при использовании подобной компенсации может составлять менее 400 нс за 24 часа, что удовлетворяет требованиям стандарта 5G.

Температурная нестабильность частоты современных термостатированных КГ может достигать $\pm 3 \times 10^{-11}$ в интервале температур $-40...+85^\circ\text{C}$ (менее 1×10^{-11} на каждые 20°C). При небольших температурных изменениях ($\sim 5^\circ\text{C}$), что справедливо для условий работы первичных часов, вклад температурной нестабильности КГ довольно мал и составляет око-

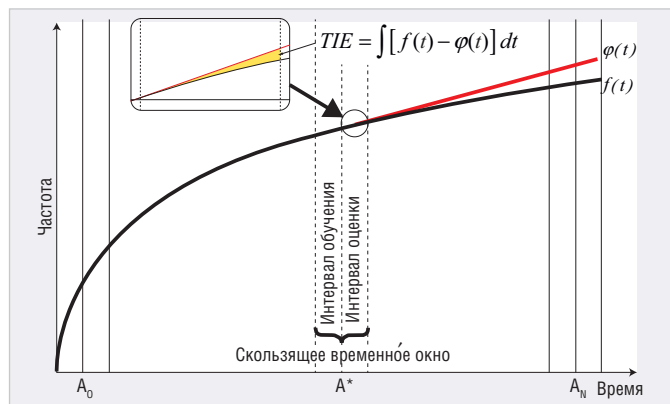


Рис. 1. Компенсация старения генератора ($f(t)$ – реальное старение (типичное старение КГ), $\phi(t)$ – прогнозируемое старение)

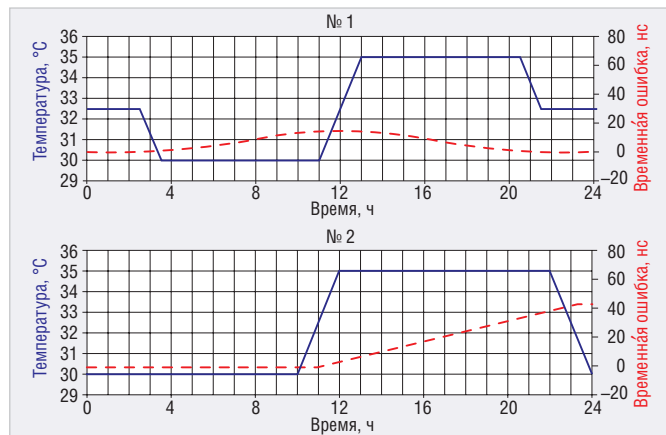


Рис. 2. Сравнение профилей изменения температуры

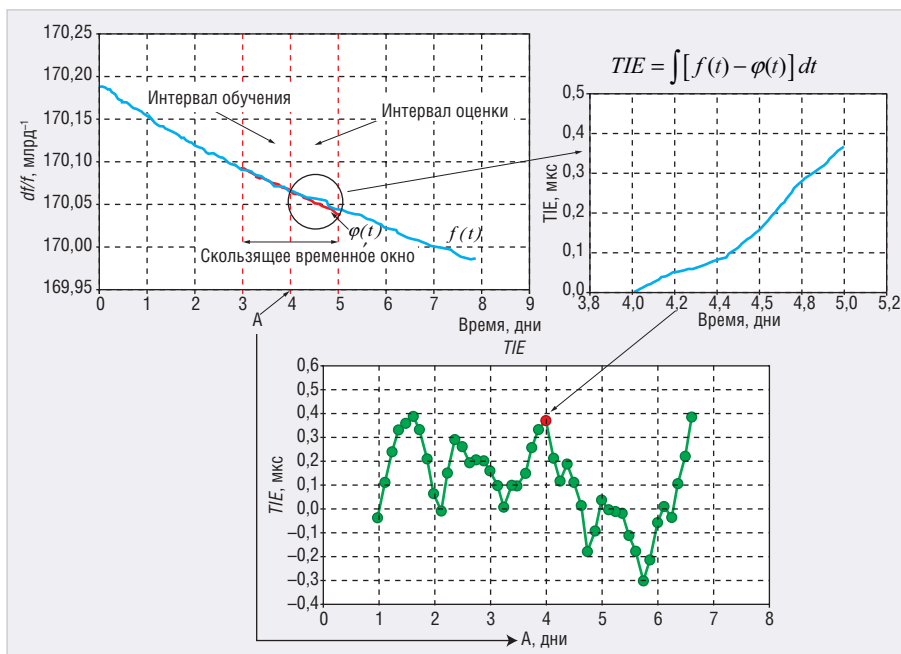


Рис. 3. Методика оценки временной ошибки

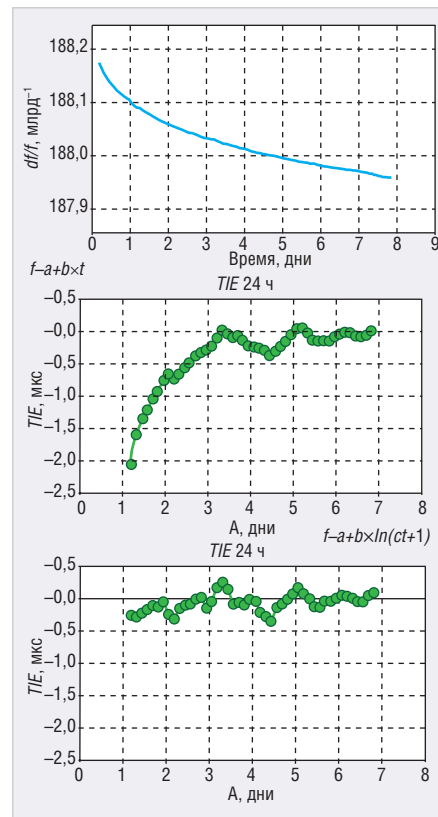


Рис. 4. Оценка временной ошибки с линейной (в центре) и логарифмической (внизу) функциями аппроксимации для одного того же кварцевого генератора

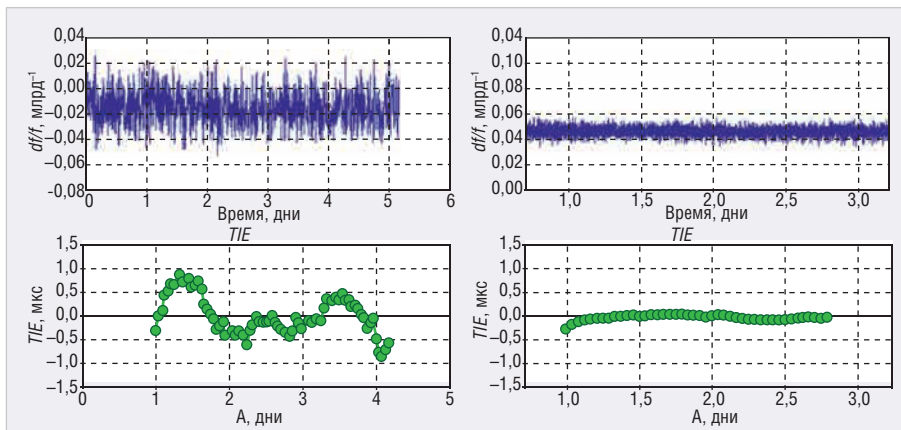


Рис. 5. Результаты оценки временной ошибки одного КГ с рубидиевым (слева) и водородным (справа) стандартом частоты в качестве опорного сигнала

до 1×10^{-12} на 5°C . Температурная стабильность рубидиевых генераторов составляет $\pm 1 \times 10^{-10}$ в интервале температур $-5...+55^\circ\text{C}$ и не является монотонной. Соответственно, её вклад во временную ошибку будет больше.

При этом стоит понимать, что сам профиль изменения температуры может существенно влиять на временную ошибку. Для примера на рисунке 2 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 (вверху) абсолютно симметричен в течении суток – максимум временной ошибки при таком профиле составляет примерно 15 нс, при этом через 24 часа она равна 0. Профиль 2 (внизу)

не симметричен – максимум временной ошибки составляет около 45 нс.

Для кварцевых генераторов, использование которых предполагает компенсацию дрейфа частоты, накладываются дополнительные требования по обеспечению монотонности дрейфа. Это достигается специальными мерами при производстве резонаторов и конструкциями самих генераторов. Для таких генераторов вводится дополнительный параметр контроля – значение временной ошибки при компенсации дрейфа частоты.

При оценке данного параметра используется алгоритм, схожий с компенсацией старения, описанной выше. Он позволяет оценить прогнозируемость и возможность компенсации старения генератора. На данные длительного изменения частоты с течением времени накладывается скользящее

временное окно, которое также состоит из двух частей: интервала обучения и интервала оценки временной ошибки, расположенных один за другим. По данным в первом интервале строится аппроксимирующая модель, по данным во втором интервале происходит оценка временной ошибки как интеграла от разницы между полученными и предсказанными значениями частоты.

На рисунке 3 показан пример оценки временной ошибки кварцевого генератора по описанной методике.

Как уже было сказано, в первое время (обычно 1–3 дня) после длительного выключения кварцевые генераторы показывают сильную логарифмическую зависимость, поэтому при необходимости компенсировать дрейф частоты на начальном участке следует использовать логарифмическую функцию аппроксимации вида $\varphi(t) = a + b \times \ln(ct + 1)$ (см. рис. 4).

При измерениях столь малых величин временной ошибки крайне важно учесть все возможные факторы, которые могут внести дополнительную погрешность. Так, например, для таких измерений в качестве опорного сигнала использовался сигнал от водородного стандарта частоты. На рисунке 5 показано изменение частоты с течением времени одно-

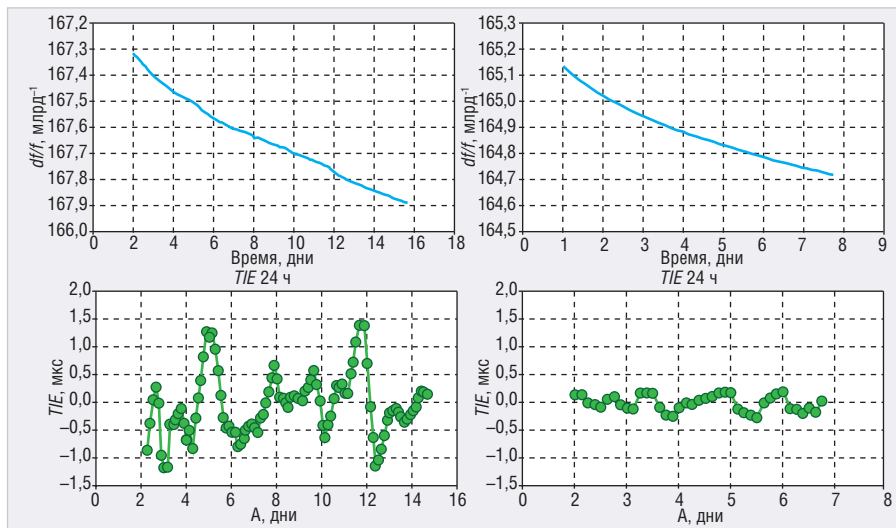


Рис. 6. Результаты оценки временной ошибки одного КГ в разных стендах

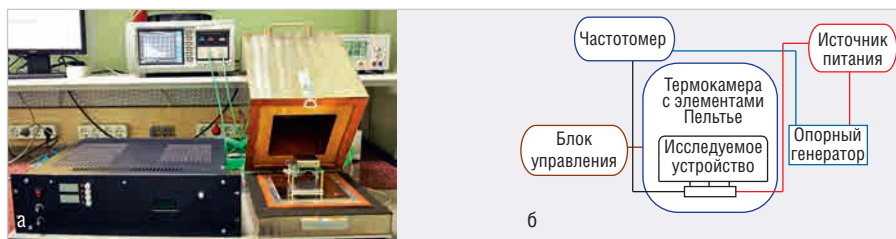


Рис. 7. Стенд для испытаний с температурной камерой на элементах Пельтье: а) общий вид; б) структурная схема

Основные параметры современных прецизионных кварцевых и рубидиевых генераторов производства АО «Морион»

Параметр	Кварцевые генераторы			Рубидиевые генераторы	
	ГК336-ТС	ГК360-ТС	ГК341-ТС	FE-5650A	FE-5680A
Предельная временная ошибка, нс:					
–при постоянной температуре	<400	<400	<400	<100	<100
–при изменении температуры в пределах 5°С в течение суток	<400	<400	<1000	<400	<400
Долговременная нестабильность частоты	±2...7×10 ⁻¹¹ /сутки ±10...30×10 ⁻⁹ /год			±0,4×10 ⁻¹¹ /сутки ±0,2×10 ⁻⁹ /год	
Температурная нестабильность частоты	±0,2×10 ⁻¹⁰ в интервале –20...+70°С	±0,1×10 ⁻¹⁰ в интервале –40...+85°С	±10×10 ⁻¹⁰ в интервале –40...+85°С	±1×10 ⁻¹⁰ в интервале –5...+55°С	
	<1×10 ⁻¹¹ на каждые 20°С в рабочем интервале температур				
Кратковременная нестабильность частоты (девиация Аллана)	0,1×10 ⁻¹² /с	2×10 ⁻¹² /с	0,2×10 ⁻¹² /с	14×10 ⁻¹² /с	
Потребляемая мощность, Вт:					
–во время включения	<16	<12	<7	<34	<36
–в установившемся режиме	<5	<4	<3	<12	<15
Габаритные размеры, мм	92×80×50	50,8×50,8×19	50,8×50,8×16	77×76×37	125×88×25

го и того же кварцевого генератора при использовании рубидиевого (слева) и водородного (справа) стандарта и полученные графики временной ошибки.

Сами испытательные стенды должны иметь кабели и соединители очень хорошего качества, чтобы свести к минимуму погрешность оценки временной ошибки. Кроме того, при испытаниях группы генераторов на

одном стенде следует учитывать взаимную синхронизацию частот измеряемых генераторов. На рисунке 6 показаны результаты оценки временной ошибки одного и того же кварцевого генератора в стенде без учёта описанных особенностей (слева), и в стенде, где они учтены (справа).

Температурная камера может иметь свои источники погрешности, напри-

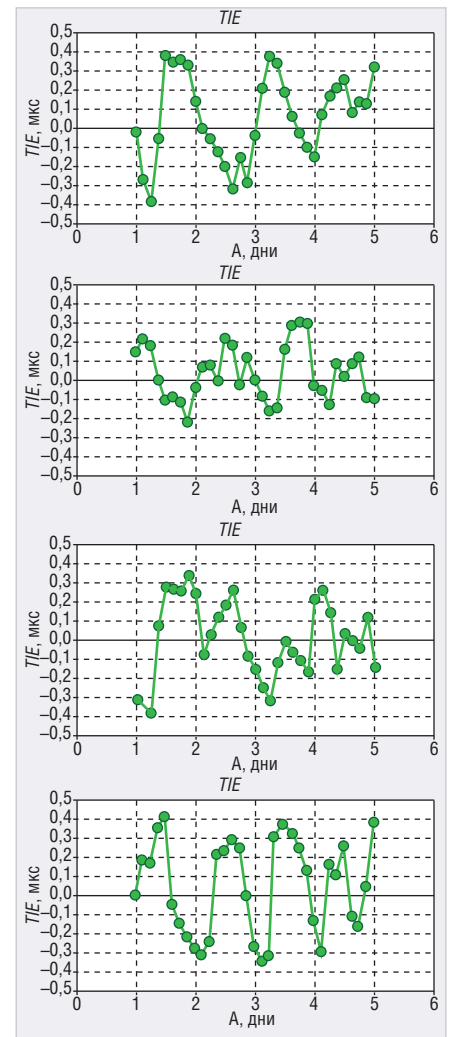


Рис. 8. Результаты измерения временной ошибки за 24 ч для прецизионных кварцевых генераторов GK360 при изменении температуры окружающей среды в пределах 5°С в течение суток

мер включение/отключение холодильника при определённой температуре. При оценке временной ошибки следует учитывать эти нюансы и подбирать испытательное оборудование и режимы работы с особой тщательностью. Для некоторых испытаний была использована температурная камера на основе элементов Пельтье (см. рис. 7).

В качестве примера генераторов, которые могут использоваться в качестве хранителей времени в телекоммуникационных системах, можно привести кварцевые генераторы типа GK360, GK336, GK341 и рубидиевые генераторы FE-5650A и FE-5680A производства АО «Морион». В таблице приведены основные параметры и предельная временная ошибка, которую могут обеспечить эти генераторы в разных режимах работы. Указанная для кварцевых генераторов временная ошибка подразумевает использование компенсации ухода частоты во време-

ни, при этом сами генераторы обязательно проходят отбор по прогнозируемости дрейфа частоты. Рубидиевые генераторы, в свою очередь, отбираются по температурной стабильности частоты.

На рисунке 8 представлены результаты оценки временной ошибки за 24 ч для прецизионных кварцевых генераторов ГК360 при изменении температуры окружающей среды в пределах 5°C в течение суток (по профилю 2, показанному на рисунке 2).

На рисунке 9 приведены результаты оценки временной ошибки за 24 ч для кварцевых генераторов ГК341 при постоянной температуре окружающей среды. При изменении температуры окружающей среды в пределах 5°C в течение суток временная ошибка для кварцевых генераторов ГК341 будет выше на ~500 нс.

На рисунке 10 показаны результаты оценки временной ошибки за 24 ч для рубидиевых генераторов типа FE-5650A при постоянной температуре.

На рисунке 11 показаны результаты измерений временной ошибки для этих же рубидиевых генераторов при изменении температуры в пределах 5°C в течение суток (по профилю 2, приведённому на рисунке 2).

Таким образом, современные прецизионные кварцевые и рубидиевые генераторы вполне могут удовлетворять требованиям нового стандарта 5G по временной ошибке и использоваться в составе первичных часов и других устройств, где требуются высокостабильные источники времени. При этом для первых особенно критичным становится долговременная нестабильность частоты, а для вторых – изменение температуры окружающей среды.

Как видно, при условии постоянной температуры окружающей среды рубидиевые генераторы показывают меньшую временную ошибку. Однако в условиях изменения температуры при использовании компенсации дрейфа частоты кварцевые генераторы за счёт большей температурной стабильности могут обеспечивать меньшую временную ошибку, при этом обладая меньшим потреблением и габаритными размерами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Han Li, Liuyan Han, Ran Duan. Synchronization Requirements of 5G and Corresponding Solutions. IEEE Communications Standards Magazine. March. 2017.

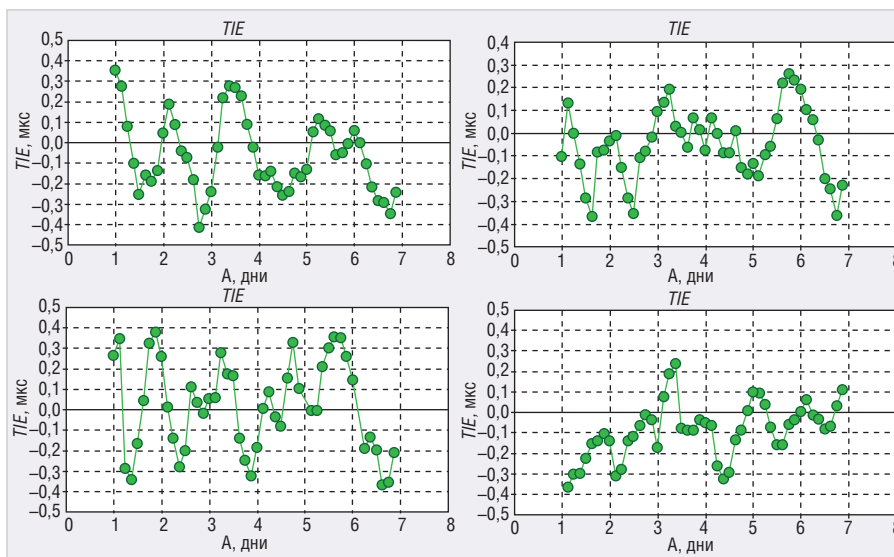


Рис. 9. Результаты измерения временной ошибки за 24 ч для прецизионных кварцевых генераторов ГК341 при постоянной температуре окружающей среды

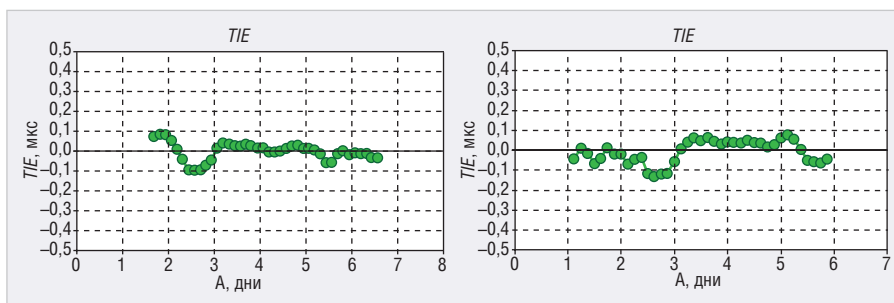


Рис. 10. Результаты оценки временной ошибки за 24 ч для рубидиевых генераторов типа FE-5650A при постоянной температуре окружающей среды

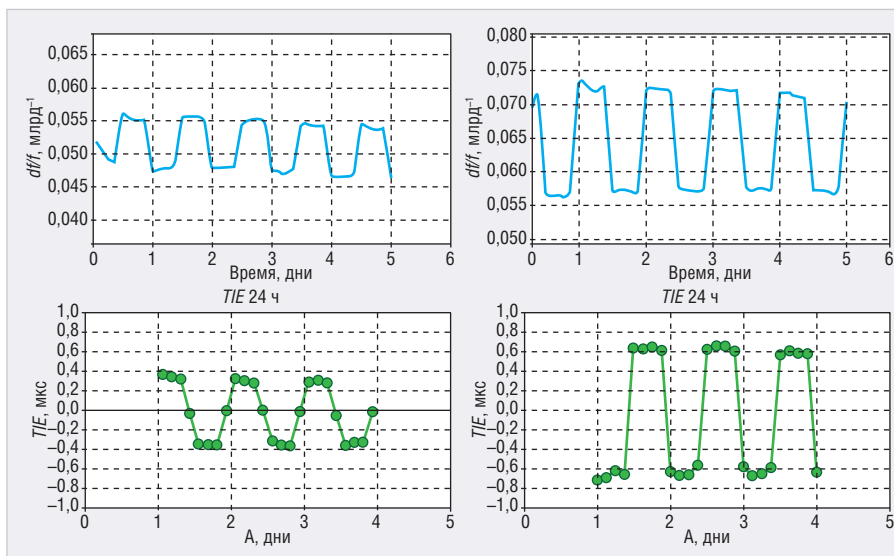


Рис. 11. Результаты измерений временной ошибки рубидиевых генераторов типа FE-5650A при изменении температуры окружающей среды в пределах 5°C в течение суток

2. Kotlyukov A., Ivanov Y., Nikonov A. Precise Frequency Sources Meeting the 5G Holdover Time Interval Error Requirement. Microwave journal. May. 2018.
3. Иванов Ю.А. О подходе к оценке временной ошибки при применении прецизионных кварцевых генерато-

ров (КГ) в новейших телекоммуникационных системах. Доклады VIII международного симпозиума «Метрология времени и пространства». Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. С. 30–35.

4. 3GPP TS 38.104 specification.

