

Хранение единицы частоты и шкалы времени высокостабильным генератором при его синхронизации по радиосигналу космических навигационных систем

Г. П. ПАШЕВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»
им. А. П. Горшкова, Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz_asu@kvarz.com

Проанализированы погрешности хранения единицы частоты и шкалы времени высокостабильным генератором при его синхронизации по радиосигналу космических навигационных систем. Рассмотрены алгоритмы синхронизации, построенные на основе прямоугольных импульсных функций. Учтены систематическая и случайная составляющие нестабильности частоты сигнала генератора и шум радиосигнала.

Ключевые слова: квантовые и кварцевые стандарты частоты, хранение единицы частоты и шкалы времени, радиосигнал, космические навигационные системы.

The analysis of error of frequency and time-keeping by high-stability generator synchronized by radio signal from space navigation systems is carried out. The synchronization algorithms based on rectangular pulse functions are considered. The systematic and random components of instability of frequency of generator signal and the noise of radio signal are taken into account.

Key words: quantum and quartz frequency standards, frequency and time-keeping, radio signals, space navigation systems.

Высокостабильные генераторы — кварцевые и квантовые стандарты частоты (КСЧ) — широко используются для хранения единицы частоты и шкалы времени. Чтобы снизить погрешности их хранения можно синхронизировать КСЧ по радиосигналам космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС/GPS. Для этого измеряют отклонение фазы сигнала КСЧ от фазы радиосигнала КНС. В приемнике радиосигнала КНС формируется последовательность импульсов, у которых положение на оси времени и частота повторения 1 Гц привязаны с высокой точностью к шкале времени и частоте государственного эталона времени и частоты. Эта последовательность, а также последовательность импульсов 1 Гц с выхода КСЧ поступают на входы измерителя интервалов времени. Измеренный интервал времени между импульсами последовательностей соответствует отклонению фазы сигнала КСЧ, выраженному во временном масштабе. Измерения проводятся периодически через единичный

интервал времени длительностью T , при этом образуется последовательность $\varphi(iT)$, $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$. На ее основании вычисляют среднее за время T относительное отклонение частоты КСЧ в момент времени iT :

$$\Delta(i) = \{\varphi(iT) - \varphi[(i-1)T]\}/T.$$

Величину $\Delta(i)$ определяют при значениях i от $-2N+1$ до 0, т. е. на интервале времени наблюдения длительностью $2N$. Она содержит две составляющие:

$$\Delta(i) = \Delta_c(i) + \Delta_p(i),$$

где $\Delta_c(i)$, $\Delta_p(i)$ — усредненные за время T отклонение частоты сигнала КСЧ и частотный шум радиосигнала КНС, причем величина $\Delta_c(i)$ для высокостабильных КСЧ хорошо аппроксимируется выражением

$$\Delta_c(i) = \bar{\alpha} + \bar{\beta}i + \Delta_{cp}(i);$$

$\bar{\alpha}$ — постоянное отклонение частоты, $\bar{\beta}$ — коэффициент ее линейного изменения; $\Delta_{cp}(i)$ — среднее за единичный интервал времени значение случайной относительной мгновенной нестабильности частоты $\nu(t)$, имеющей нулевое среднее на бесконечном интервале времени,

$$\Delta_{cp}(i) = \frac{1}{T} \int_{(i-1)T}^{iT} \nu(t) dt. \quad (1)$$

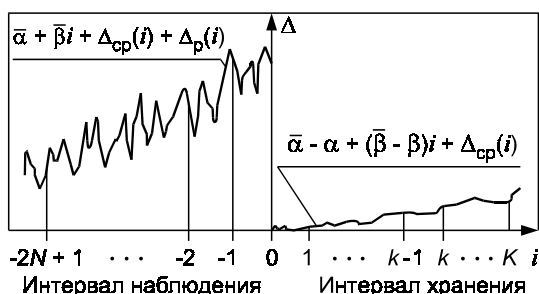


Рис. 1. Результаты измерения отклонений частоты КСЧ на интервалах наблюдения и хранения

Длительные наблюдения [1, 2] показывают, что частотный шум $\Delta_p(i)$ радиосигнала КНС имеет стационарный характер и дисперсию σ_p^2 .

Синхронизация выполняется по следующему алгоритму. Сначала по значениям $\Delta(i)$ на интервале времени наблюдения $[(-2N + 1)T; 0]$ определяют оценки величин $\bar{\beta}$ и $\bar{\alpha}$. В [2] показано, что для этого целесообразно применять простые и достаточно точные несмещенные оценки

$$\beta = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{-N+1} \Delta(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=-N}^{-2N+1} \Delta(i) \right]; \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{-2N+1} [\Delta(i) - \beta i]. \quad (3)$$

После этого частоту сигнала КСЧ корректируют — вводят поправки (2) и (3), чтобы скомпенсировать линейное изменение и постоянное отклонение частоты на k -м единичном интервале $[(k-1)T; kT]$ из интервала времени хранения $[0; kT]$.

Частотный шум радиосигнала КНС и случайная нестабильность частоты сигнала КСЧ не позволяют точно определить $\bar{\alpha}$ и $\bar{\beta}$ по (2), (3) и полностью скомпенсировать их при коррекции. Кроме того, на интервале хранения действует случайная нестабильность $\nu(t)$ частоты сигнала КСЧ. Поэтому хранение единицы частоты и шкалы времени будет осуществляться с некоторой погрешностью. На рис. 1 для наглядности показан график отклонения частоты при синхронизации КСЧ по радиосигналу КНС.

Вопросам синхронизации КСЧ по радиосигналам точного времени КНС посвящено большое количество работ. Можно сослаться, например, на [3], где кроме анализа одного из вариантов системы синхронизации дан библиографический обзор по этой тематике. До сих пор структура и алгоритмы систем синхронизации выбирали исходя из предпосылок, что случайная нестабильность частоты сигнала КСЧ пренебрежимо мала по сравнению с частотным шумом радиосигнала и что эта частота отклоняется от частоты радиосигнала на постоянную величину. Такие предпосылки справедливы при небольших интервалах времени наблюдения и хранения, когда случайная нестабильность и линейное изменение частоты сигнала КСЧ не оказывают существенного влияния на погрешность хранения единицы частоты и шкалы времени. Однако при интервалах времени хранения более 1 ч эти факторы могут оказывать основное влияние на погрешность хранения. Поэтому необходим анализ указанной погрешности с учетом случайной нестабильности и линейного изменения частоты сигнала КСЧ. Цель настоящей статьи — анализ этой погрешности при различных вариантах алгоритма синхронизации.

Погрешность хранения среднего значения частоты на единичном интервале времени $[(k-1)T; kT]$. С учетом коррекции частоты КСЧ на поправки (2), (3) погрешность хранения среднего на единичном интервале $[(k-1)T; kT]$ значения частоты будет

$$\varepsilon(k, N) = \Delta_c(k) - \alpha - k\beta. \quad (4)$$

Из (1) — (4) следует, что $\varepsilon(k, N)$ — случайная величина с нулевым средним, которая содержит две случайные составляющие: $\varepsilon_c(k, N)$ — погрешность из-за нестабильности частоты сигнала КСЧ и $\varepsilon_p(k, N)$ — погрешность вследствие частотного шума радиосигнала:

$$\varepsilon(k, N) = \varepsilon_c(k, N) + \varepsilon_p(k, N), \quad (5)$$

где

$$\varepsilon_c(k, N) = \Delta_{cp}(k) - \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{-2N+1} \Delta_{cp}(i) - \frac{k_1}{N^2} \left[\sum_{i=0}^{-N+1} \Delta_{cp}(i) - \sum_{i=-N}^{-2N+1} \Delta_{cp}(i) \right], \quad (6)$$

$$k_1 = (2N + 2k - 1)/2;$$

$$\varepsilon_p(k, N) = -\frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{-2N+1} \Delta_p(i) - \frac{k_1}{N^2} \left[\sum_{i=0}^{-N+1} \Delta_p(i) - \sum_{i=-N}^{-2N+1} \Delta_p(i) \right]. \quad (7)$$

Случайная нестабильность частоты сигнала КСЧ и частотный шум радиосигнала КНС имеют различную физическую природу. Случайные величины (6), (7) можно считать статистически независимыми, поэтому дисперсию погрешности (5) хранения частоты на k -м интервале времени T можно представить как

$$\sigma_\varepsilon^2(k, N) = \sigma_{\varepsilon c}^2(k, N) + \sigma_{\varepsilon p}^2(k, N), \quad (8)$$

где $\sigma_{\varepsilon c}^2(k, N)$, $\sigma_{\varepsilon p}^2(k, N)$ — составляющие дисперсии, обусловленные нестабильностью частоты сигнала КСЧ и частотным шумом радиосигнала.

Возведя (6) в квадрат и выполнив статистическое усреднение, получим общее выражение для дисперсии величины $\varepsilon_c(k, N)$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon c}^2(k, N) = & \left[-2(N^2 + 4k_1^2) \sum_{i=0}^{-N+1} \sum_{j=0}^{-N+1} \sigma_c^2(i, j) - \right. \\ & - 2(N^2 - 4k_1^2) \sum_{i=0}^{-N+1} \sum_{j=0}^{-N+1} \sigma_c^2(i - N, j) + \\ & \left. + 4(N + 2k_1) \sum_{i=0}^{-N+1} \sigma_c^2(i, k) + 4(N - 2k_1) \sum_{i=0}^{-N+1} \sigma_c^2(i - N, k) \right] / (4N^4), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\sigma_c^2(i, j) = \langle [\Delta_{cp}(i) - \Delta_{cp}(j)]^2 \rangle / 2 \quad (10)$$

дисперсия Алана [4] случайной нестабильности частоты $\nu(t)$ выходного сигнала КСЧ; $\langle \rangle$ — знак статистического усреднения.

Заметим, что $\sigma_c(1, 0)$ соответствует общепринятой метрологической характеристике нестабильности частоты $\sigma_y(T, T)$ [5] — относительному двухвыборочному среднему квадратическому отклонению (СКО) частоты (корню квадратному из дисперсии Алана).

Соотношение (9) позволяет рассчитать дисперсию погрешности хранения единицы частоты исходя из результатов измерения $\sigma_c^2(i, j)$ или принятой модели случайной нестабильности частоты выходного сигнала КСЧ. Дискретные функции $\sigma_c^2(i, j)$ для моделей нестабильности частоты вида случайные блуждания, фликерный шум и белый шум известны и приведены, например, в [6]. На интервалах времени наблюдения и хранения больше 1 ч эти виды нестабильности вносят преобладающий вклад в погрешность хранения единицы частоты.

Случайные блуждания частоты имеют спектральную плотность мощности (СПМ) A_{-2}/ω^2 (A_{-2} — константа) и характеризуются дисперсией Аллана

$$\sigma_c^2(i, j) = \begin{cases} \sigma_y^2(T, T)(3 - |i - j| - 1)/2 & \text{при } i \neq j; \\ 0 & \text{при } i = j. \end{cases} \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9) и выполняя суммирование, получаем формулу для расчета дисперсии погрешности хранения единицы частоты, обусловленную случайными блужданиями частоты сигнала КСЧ (табл. 1, строка 1).

Таблица 1

Дисперсия погрешности хранения частоты, нормированная к $\sigma_y^2(T, T)$

Вид шума	Формула для расчета нормированной дисперсии
Случайные блуждания частоты КСЧ	$[2N^2 + N(8k - 5) + (2k - 1)^2] / (2N)$
Белый шум частоты КСЧ	$[2N^3 + 5N^2 + 4N(2k - 1) + (2k - 1)^2] / (2N^3)$
Белый шум частоты радиосигнала	$[5N^2 + 4N(2k - 1) + (2k - 1)^2] / (2N^3)$

Для фликерных шумов частоты КСЧ, имеющих СПМ A_{-1}/ω (A_{-1} — константа), дисперсия Алана (10) представляет собой сложную комбинацию логарифмических функций [6], и прямое суммирование (9) выполнить трудно. В связи с этим

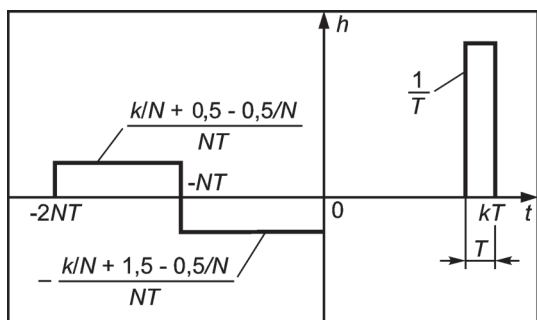


Рис. 2. Импульсная функция

для анализа погрешности хранения частоты, вызываемой фликерными шумами, целесообразно воспользоваться спектральным представлением. Формула (6) соответствует интегрированию случайной относительной нестабильности частоты $v(t)$ с импульсной весовой функцией $h(t)$, показанной на рис. 2.

Можно найти квадрат модуля $H(\omega)$ преобразования Фурье импульсной весовой функции $h(t)$ и численными методами интегрирования определить дисперсию погрешности хранения единицы частоты при фликерных шумах

$$\sigma_{\text{сч}}^2(k, N) = \sigma_y^2(T, T)(2 \ln 2)^{-1} \int_0^{\infty} H(\omega) / \omega d\omega, \quad (12)$$

где $\sigma_y^2(T, T)$ — двухвыборочная дисперсия Аллана фликерных шумов частоты КСЧ,

$$\sigma_y^2(T, T) = A_{-1} \int_0^{\infty} [2 \sin^4(\omega T / 2) / (\omega T / 2)^2] / \omega d\omega = A_{-1} 2 \ln 2.$$

Интегрирование показывает, что при $N < 10$ дисперсия (12) быстро возрастает пропорционально k^2 и синхронизация становится неэффективной. При $N > 10$ дисперсия (12) увеличивается по линейному закону с крутизной B и постоянным отклонением A . Значения B и A для различных $N > 10$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры линейной функции дисперсии погрешности хранения частоты

N	10	15	20	25	30
A	1,10	2,56	3,12	3,42	3,63
B	1,21	0,62	0,42	0,32	0,26

Белый шум частоты КСЧ имеет постоянную СПМ A_0 и дисперсию Аллана

$$\sigma_c^2(i, j) = \begin{cases} \sigma_y^2(T, T) & \text{при } i \neq j; \\ 0 & \text{при } i = j. \end{cases} \quad (13)$$

При этом суммирование по (9) дает формулу расчета дисперсии погрешности единицы хранения частоты, приведенную в строке 2 табл. 1.

Длительные наблюдения [2] показывают, что для радиосигнала значения $\Delta_p(i)$ и $\Delta_p(j)$ при $i \neq j$ слабо коррелированы между собой, т. е. приблизительно соответствуют выборкам из белого шума. Дисперсия Аллана для таких выборок соответствует (12) и при $i \neq j$ равна σ_p^2 . Преобразования (7), аналогичные предыдущим, приводят к формуле для расчета дисперсии погрешности хранения единицы частоты, обусловленной шумами радиосигнала (табл. 1, строка 3).

Система синхронизации на основе рассмотренного алгоритма строится с применением цифрового вычислительно-управляющего устройства (ЦВУ) и сопряжена с тремя особенностями. При непрерывном измерении отклонения фазы

Таблица 3

Дисперсия случайной погрешности хранения частоты, нормированная к $\sigma_y^2(T, T)$

Вид шума	Формулы для расчета дисперсии случайной погрешности	
	без компенсации по (14)	с частичной компенсацией по (3)
Случайные блуждания частоты КСЧ	$2N + 3k - 2$	$[2N^2 + N(6k - 5) + 1]/(2N)$
Фликерный шум частоты КСЧ при $N > 10$	$\sim [3,5 + 0,5 \ln k]$	$\sim [3,75 + 0,85 \ln k]$
Белый шум частоты КСЧ	$1 + 1/(2N)$	$1 + (5N^2 - 4N + 1)/(2N^3)$
Белый шум частоты радиосигнала	$1/(2N)$	$(5N^2 - 4N + 1)/(2N^3)$

$\varphi(iT)$ и периодическом вводе поправок (2), (3) (например, на каждом единичном интервале T) интервалы наблюдения и хранения могут перекрываться. Поэтому в памяти ЦВУ должна храниться последовательность $\varphi(iT)$ без учета коррекций. Кроме того, для каждого $k \geq 1$ система должна автоматически корректировать частоту КСЧ на заранее рассчитанную величину $k\beta$. Наконец, в ряде случаев для каждого значения k можно найти значение N , дающее минимум погрешности хранения единицы частоты. Поэтому для получения минимальной погрешности для различных k требуется пересчет поправок (2), (3). Пример построения такой системы приведен в [7].

Структуру системы синхронизации можно существенно упростить, применив более простые, хотя и более «грубые» алгоритмы расчета поправок. Например, при коротких интервалах времени хранения и малом линейном изменении частоты КСЧ можно полностью отказаться от компенсации линейного изменения частоты и вести коррекцию только по среднему отклонению так, как описано в [3]:

$$\alpha = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{-2N+1} \Delta(i). \quad (14)$$

При этом погрешность хранения единицы частоты

$$\varepsilon(k, N) = \bar{\beta}(k + N) + [\sigma_{\text{сч}}^2(k, N) + \sigma_{\text{ср}}^2(k, N)]^{0,5}. \quad (15)$$

Из (15) следует быстрое нарастание систематической составляющей погрешности при увеличении суммарной длительности $(k + N)T$ интервалов времени наблюдения и хранения. Эту зависимость можно ослабить, частично скомпенсировав влияние линейного изменения частоты. При этом среднее отклонение частоты на интервале наблюдения нужно находить с учетом исключения линейного изменения частоты по (3). Тогда первое слагаемое в (15) уменьшается и становится равным $\bar{\beta}k$. Формулы для расчета $\sigma_{\text{сч}}^2(k, N)$ и $\sigma_{\text{ср}}^2(k, N)$ для алгоритмов синхронизации на основе (14) и (3) приведены в табл. 3.

Погрешность хранения шкалы времени на интервале времени $[0, kT]$. При полной компенсации постоянного отклонения и линейного изменения частоты с учетом введения поправок (2), (3) погрешность хранения шкалы времени КСЧ на интервале времени kT будет

$$\eta(k, N) = T \sum_{i=1}^k \varepsilon(k, N).$$

При коррекции частоты на указанные поправки систематические составляющие результатов измерения $\varepsilon(k, N)$ исключены, поэтому и величина $\eta(k, N)$ является случайной, имеет нулевое среднее и содержит две статистически независимые составляющие, соответствующие вкладу в погрешность хранения шкалы времени частотной нестабильности сигнала КСЧ и частотного шума радиосигнала КНС:

$$\eta(k, N) = \eta_{\text{с}}(k, N) + \eta_{\text{р}}(k, N),$$

где

$$\eta_{\text{с}}(k, N) = T \sum_{i=1}^k \varepsilon_{\text{с}}(k, N); \quad \eta_{\text{р}}(k, N) = T \sum_{i=1}^k \varepsilon_{\text{р}}(k, N). \quad (16)$$

Подставив в (16) выражения (6), (7) для $\varepsilon_{\text{с}}(k, N)$ и $\varepsilon_{\text{р}}(k, N)$, получим формулы для расчета дисперсий этих составляющих, аналогично тому, как было сделано при анализе погрешности хранения единицы частоты. Эти формулы с учетом принятых ранее моделей нестабильности частоты КСЧ и шума частоты радиосигнала приведены в табл. 4.

Таблица 4

Дисперсия погрешности хранения шкалы времени, нормированная к $T^2 \sigma_y^2(T, T)$

Вид шума	Формулы для расчета нормированной дисперсии
Случайные блуждания частоты КСЧ	$k^2 (2N^2 + 3kN + k^2)/(2N)$
Фликерный шум частоты КСЧ	$\sim k^2 (0,015N + 2,26)$ при $10 \leq N \leq 100, 3 \leq k \leq 30$
Белый шум частоты КСЧ	$k [1 + k (5N^2 + 4kN + 1)/(2N^3)]$
Белый шум частоты радиосигнала	$k^2 (5N^2 + 4kN + 1)/(2N^3)$

Если линейное отклонение не компенсировать или компенсировать частично, то погрешность хранения шкалы времени будет содержать систематические составляющие:

Таблица 5

Дисперсия случайной погрешности хранения шкалы времени, нормированная

к $T^2 \sigma_y^2(T, T)$

Вид шума	Формулы для расчета нормированной дисперсии	
	без компенсации по (14)	с частичной компенсацией по (3)
Случайные блуждания частоты КСЧ	$k^2 (2N + 2k)$	$k^2 [2N^2 + (2k - 1)N + 1]$
Фликерный шум частоты КСЧ при $N > 10$	$\sim k^2 (2 - 0,57 \ln k)$	$\sim 3,79 k^2$
Белый шум частоты КСЧ	$k (2N + k)/(2N)$	$k + k^2 [(5N^2 + 4kN + 1)/(2N^3)]$
Белый шум частоты радиосигнала	$k^2/(2N)$	$k^2 (5N^2 + 4kN + 1)/(2N^3)$

$T \bar{\beta} k (N + 0,5k)$ в первом случае и $0,5 T \bar{\beta} k^2$ — во втором. Дисперсии случайных составляющих погрешности для этих способов коррекции частоты приведены в табл. 5.

Результаты анализа позволяют рассчитать погрешности хранения единицы частоты и шкалы времени при заданных значениях длительностей единичного интервала T и интервала наблюдения $2NT$, а также оптимизировать длитель-

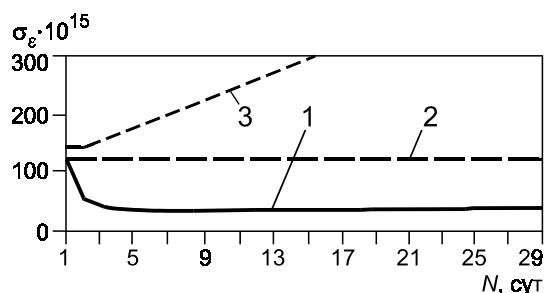


Рис. 3. Погрешность хранения частоты в течение 10 сут после коррекции при различных вариантах компенсации линейного изменения частоты сигнала КСЧ:

1, 2 — полная и частичная компенсация; 3 — без компенсации

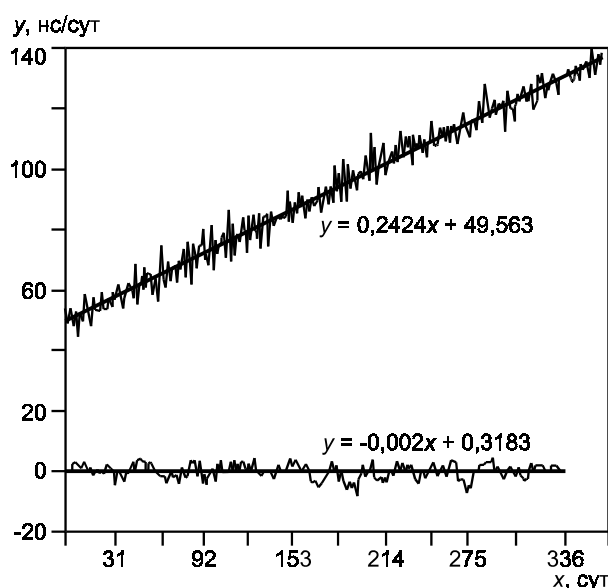


Рис. 4. Отклонения частоты «свободного» (вверху) и синхронизированного КСЧ

ность интервала наблюдения с целью минимизации этих погрешностей. Выбор алгоритма синхронизации зависит от уровня частотного шума радиосигнала, характера и значения $\sigma_y(T, T)$ нестабильности частоты КСЧ, длительности интервала хранения и поэтому требует детального анализа в каждом конкретном случае.

Пример. Рассмотрим применение водородного КСЧ, в котором нет автоматической подстройки частоты резонатора, в качестве хранителя единицы частоты при его синхронизации по радиосигналу КНС.

Для приема радиосигнала используем одноканальный приемник, имеющий выходной импульсный сигнал с частотой повторения 1 Гц со среднесуточным относительным СКО частоты $\sigma_p = 4,1 \cdot 10^{-14}$ [2]. Начальное постоянное отклонение частоты КСЧ составляет $62 \cdot 10^{-14}$, случайная нестабильность частоты, имеющая характер случайных блужданий с $\sigma_y(T, T) = 5 \cdot 10^{-15}$ и $\bar{\beta} = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ сут}^{-1}$. Единичный интервал $T = 1$ сут. На рис. 3 показаны графики средней квадратической погрешности хранения частоты КСЧ на десятые сутки, считая от момента коррекции ($k=10$), в зависимости от длительности интервала наблюдения при различных алгоритмах синхронизации. Графики получены на основе выражения (8) и формул приведенных в табл. 1, 3.

Из рис. 3 следует, что нужно отдать предпочтение сложному алгоритму (6), (7), который при времени наблюдения 10 сут дает минимум погрешности в несколько раз ниже по сравнению с упрощенными алгоритмами. На рис. 4 приведены экспериментальные результаты измерения отклонения частоты «свободного» и синхронизированного КСЧ при $k=10$, $N=10$. При синхронизации практически полностью исключается линейное систематическое изменение частоты, в сто раз уменьшается постоянное отклонение частоты и в 1,5 раза (по СКО) — влияние частотного шума радиосигнала.

При ежесуточной коррекции ($k=1$) для быстрой оценки длительности оптимального времени наблюдения в случае алгоритма с полной компенсацией линейного изменения частоты удобно воспользоваться упрощенным (поскольку $N \gg 1$) выражением для погрешности хранения единицы частоты

$$\sigma_\epsilon^2(1, N) = N \sigma_y^2(T, T) + 2,5 \sigma_p^2 / N. \quad (17)$$

Из (17) следует, что минимальное значение погрешности $\sigma_\epsilon(1, N) = 1,8 [\sigma_p \sigma_y(T, T)]^{0,5}$ получается при $N = 1,58 \sigma_p / \sigma_y(T, T)$. Для рассматриваемого практического случая $N = 13$ сут, $\sigma_\epsilon(1, 13) = 2,5 \cdot 10^{-14}$.

Заключение. Проведенный анализ показал возможность расчета погрешности хранения единицы частоты и шкалы времени КСЧ, синхронизированного по радиосигналу КНС, на основе общепринятой метрологической характеристики нестабильности частоты $\sigma_y(T, T)$ — относительного двухвыборочного СКО частоты (корень квадратный из дисперсии Аллана) за единичный интервал времени T .

По результатам анализа можно выбрать вид алгоритма синхронизации, длительности единичного интервала време-

ни и интервала наблюдения, при которых обеспечивается допустимая или минимальная погрешность хранения единицы частоты и шкалы времени на заданном интервале времени хранения.

Л и т е р а т у р а

1. Levandovski W., Jiang Z. Use of GLONASS at the BIPM // Proc. 41st Annu. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2009. P. 5—13.

2. Пашев Г. П. Погрешность определения коэффициента линейного изменения и постоянного отклонения частоты высокостабильных генераторов по радиосигналам космических навигационных систем // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 42—46; Pashev G. P. The error in determining the linear frequency drift coefficient and constant frequency deviation of highly stable oscillators by the radio signals of space navigation systems // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 5. P. 536—543.

3. Smaliy Y. S., Ibarro-Manzano O., Arceo-Miquel L. Efficient Predictive Steering of Local Clocks in GPS-based Timekeeping // Europ. Frequency and Time Forum, 2009. P. 727—732.

4. Рютман Ж. Характеристики нестабильности частоты и фазы сигналов высокостабильных генераторов // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 9. С. 70—102.

5. ГОСТ 8.967—99. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

6. Пашев Г. П. Анализ дискретных алгоритмов синхронизации группы квантовых стандартов частоты // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 56—61; Pashev G. P. Analysis of discrete algorithms for synchronizing a group of quantum frequency standards // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 9. P. 1006—1014.

7. Пашев Г. П. Установка для синхронизации высокостабильных генераторов по радиосигналам космических навигационных систем // Радиоизмерения и электроника. 2011. № 15. С. 3—4.

Дата принятия 11.09.2012 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.39

Измерительный преобразователь температуры

Ю. М. БАРКОВСКИЙ, С. И. КАМАЛХОДЖАЕВ

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия:
e-mail: barkovsky_ura@mail.ru

Рассмотрена методика расчета измерительного преобразователя температуры, выполненного по схеме автокомпенсатора напряжения на основе использования операционного усилителя и мостовой схемы с двумя диагоналями питания. Предложенная методика позволяет определить номиналы всех резисторов из условий получения заданных характеристик измерительного преобразователя температуры.

Ключевые слова: измерительный преобразователь температуры, мостовая схема, нелинейная характеристика.

The method of calculation of measuring temperature converter designed according to the scheme of self-balancing voltage potentiometer based on usage of operation amplifier and bridge circuit with two power diagonals is considered. This method allows to determine the nominal values of all resistors according to conditions for obtaining the specified characteristics of measuring temperature converter.

Key words: measuring temperature converter, bridge circuit, nonlinear characteristic.

В рассматриваемом измерительном преобразователе (ИП) сигнала от термопреобразователя сопротивления (ТС) в напряжение постоянного тока 0—10 В использован принцип дополнительного изменения тока в ТС с нелинейной характеристикой путем создания в мостовой схеме (МС) второй диагонали питания [1], к которой подводится обратная связь от измерительной диагонали.

В [1] отмечено, что возможно несколько вариантов построения ИП температуры, работающих в комплекте с ТС. На рис. 1 приведена схема одного из подобных преобразователей, предназначенного для применения в качестве входного усилителя в аналоговых и цифровых измерителях температуры [2]. При помощи трехпроводной линии связи ТС включен в плечо ab мостовой схемы МС так, что два провода этой линии находятся соответственно в соседних плечах ab и ad ,

а третий — во входной цепи операционного усилителя ОУ. Линии связи с подгоночными резисторами на рис. 1 не показаны. Измерительная диагональ ac соединена со входами ОУ, а диагональ питания db подключена к стабилизатору тока СТ. Выходное напряжение U ОУ подается на последовательно соединенные резисторы R , R_{k2} и R_{k1} . Резистор R служит для ограничения тока I в цепи обратной связи ОУ. Резистор отрицательной обратной связи R_{k1} в плече cb необходим для выбора заданного диапазона измерения. Резистор положительной обратной связи R_{k2} в плече cd предназначен для получения линейной характеристики преобразования при использовании платиновых ТС. В плече ab последовательно с ТС включен добавочный резистор для обеспечения начала диапазона измерения. Сопротивление нагрузки между выходом ОУ и общей шиной на схеме не показано.