

Современные приемники эталонных сигналов частоты и времени (приемники-компараторы)

В.В. Акулов, А.И. Пихтелев

ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова
603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
пр. Гагарина, 176

В статье рассматриваются принципы построения современных приемников эталонных сигналов частоты и времени, включая сигналы ГЛОНАСС/GPS. Предложена математическая модель системы синхронизации приемника-компаратора и приведены результаты ее анализа и моделирования.

Ключевые слова: приемник-компаратор, система синхронизации, эталонные сигналы частоты и времени.

Введение

Приемники-компараторы широко используются для сличения частоты местных кварцевых и квантовых стандартов частоты (КСЧ) по эталонным сигналам частоты и времени (ЭСЧВ).

Специальные длинноволновые радиостанции РБУ (г. Москва), РТЗ и РВ-166 (г. Иркутск), РВ-76 (г. Новосибирск) передают ЭСЧВ с относительной погрешностью по частоте не более $\pm 5 \cdot 10^{-12}$. Эти радиостанции имеют ограниченную зону действия – менее 3000 км. С вводом в эксплуатацию космических радионавигационных систем (КНС) ГЛОНАСС/GPS появилась возможность приема более точных ЭСЧВ в диапазоне СВЧ в любой точке поверхности Земли.

Цель работы – на примерах разработанных в последнее время серийных приемников-компараторов рассмотреть принципы построения приборов данного типа, предложить и обосновать математическую модель – уравнения динамики системы синхронизации приемника-компаратора и привести результаты ее анализа и моделирования.

Приемники-компараторы решают следующие основные задачи:

- прием радиосигналов ЭСЧВ;
- определение относительной погрешности по частоте внешнего КСЧ по сигналам ЭСЧВ;
- синхронизация внутреннего или внешнего КСЧ по сигналам ЭСЧВ;
- вычисление статистических характеристик нестабильности частоты КСЧ.

На рис. 1 показана структурная схема современных, наиболее точных приемников-компараторов ЧК7-54, ЧК7-56, работающих по радиосигналам КНС ГЛОНАСС/GPS.

Приемником сигналов КНС служит выпускаемый РИРВ (г. Санкт-Петербург) модуль приемоизмерительный К-161 (ЧК7-54) или модуль радионавигационный приемоизмерительный 14Ц850 производства КБ «НАВИС» (г. Москва) (ЧК7-56). В качестве управляемого КСЧ используется рубидиевый стандарт частоты Ч1-84А, выпускаемый АО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова», г. Н.Новгород. Функции измерителя временных интервалов с дискретностью счета 10 нс выполняет формирователь шкалы времени (ФШВ). Относительная среднеквадратическая погрешность измерения частоты (СКО) КСЧ равна приблизительно $1 \cdot 10^{-12}$ при времени измерения 1 сутки и СКО шкалы времени (ШВ) на выходе приемника 30–50 нс.

1. Постановка задачи

Система синхронизации внутреннего КСЧ по сигналам КНС, обобщенная схема которой представлена на рис. 2, включает в себя два контура: первый контур – по ШВ (тонкая линия), второй – по частоте (жирная линия).

Первый контур синхронизации по ШВ работает по алгоритму обработки кодированных посылок сигналов времени [1] на начальном этапе процесса синхронизации КСЧ (в течение 10–30 с) и при сбоях шкал времени. Первый контур

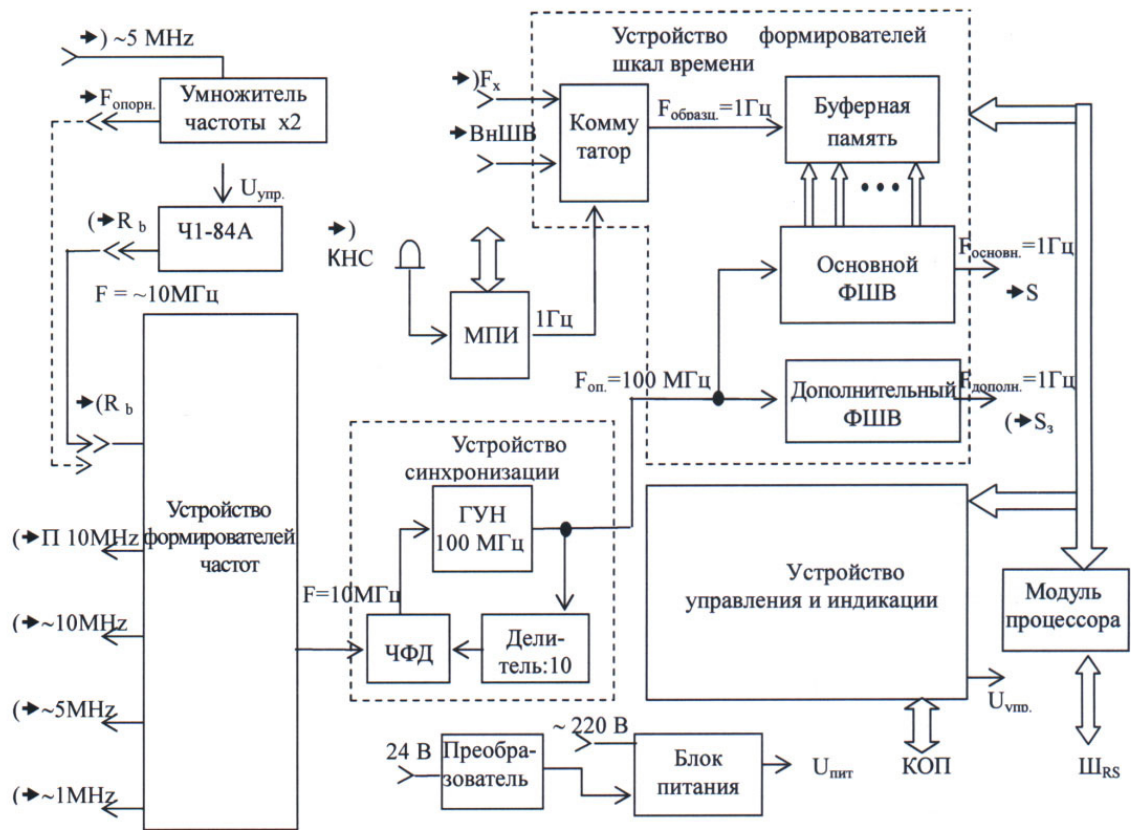


Рис. 1. Структурная схема приемника-компаратора

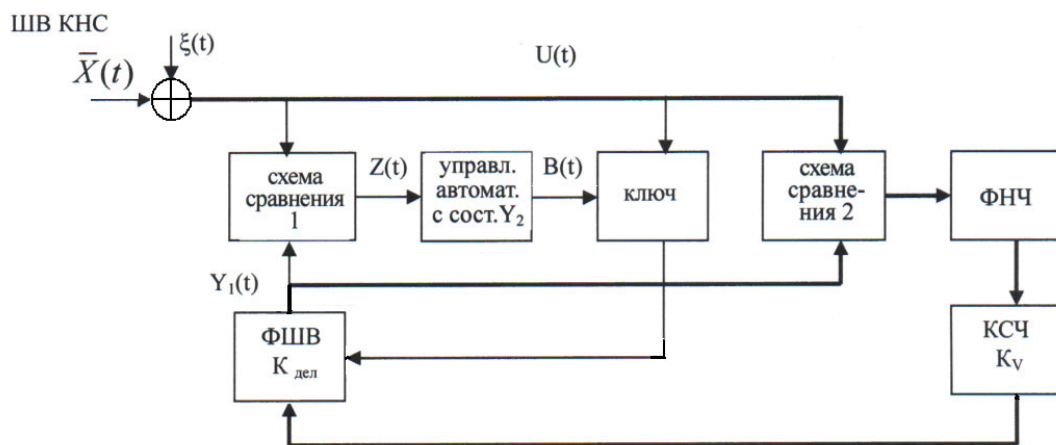


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы синхронизации

позволяет уменьшить в 1,5–2 раза СКО ШВ внутреннего КСЧ по сравнению с СКО принятой ШВ КНС.

Алгоритм работы системы синхронизации по ШВ включает в себя следующие действия:

- при включении ФШВ автоматически первоначально устанавливает ШВ КСЧ по ШВ принятого радиосигнала;
- далее с интервалом времени $T_{изм}$ проводится сравнение ШВ принятого сигнала с сигналом ФШВ;
- если при этом разность моментов времени формирования ШВ попала в заранее заданный

интервал T_3 , то новая установка не проводится, при этом состояние управляющего автомата $Y_2(t)$, фиксирующее число следующих подряд непопаданий в заранее заданный интервал, сбрасывается на 0;

- если же разность ШВ не попала в интервал T_3 и число следующих подряд таких непопаданий достигло порогового уровня q , то предполагается, что начальная установка ШВ КСЧ проведена неверно, и осуществляется новая начальная установка.

Для математического описания первого контура синхронизации считаем, что сигнал ШВ

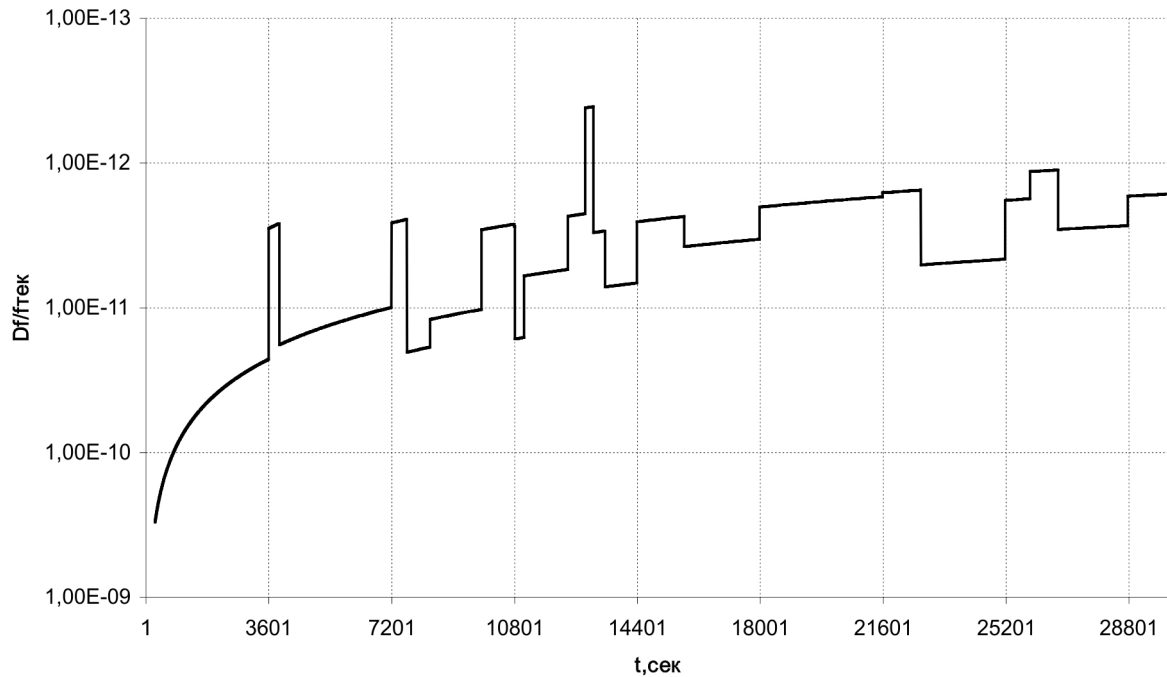


Рис. 3. График текущей относительной отстройки частоты КСЧ



Рис. 4. График среднесуточной погрешности измерений приемника-компаратора ЧК7-56

на входе приемника содержит эталонную ШВ $\bar{X}(t)$, по величине численно равную постоянной задержке радиосигнала, которая обычно может быть скомпенсирована, и аддитивный шум задержки радиоканала $\xi(t)$. Таким образом, сигнал $U(t) = \bar{X}(t) + \xi(t)$.

Случайная нестабильность ШВ КСЧ мала по сравнению с шумами задержки радиоканала $\xi(t)$ и, при дальнейшем анализе, не учитывается.

ШВ КСЧ $Y_1(t)$ сравнивается с $U(t)$ и по результату этого сравнения вырабатывается сигнал ошибки $Z(t)$, поступающий на управляющий автомат с внутренним состоянием $Y_2(t)$, который

вырабатывает сигнал управления ключом $B(t)$. Через ключ входной сигнал $U(t)$ проходит или не проходит на вход установки в «0» ФШВ КСЧ.

Второй контур синхронизации по частоте реализует дискретную цифро-аналоговую ФАПЧ 1-го порядка, при этом будем считать, что постоянная ФНЧ много меньше кольца ФАПЧ с делителем частоты (ФШВ).

2. Уравнения динамики

Исходя из системы уравнений динамики непрерывной системы ФАПЧ [2] и алгоритма рабо-

ты 1-го контура синхронизации, для совместной дискретной системы ФАПЧ можно записать систему стохастических уравнений:

$$\begin{cases} Y_1(t+T) = (1 - \delta(t - kT)) ((1 - B(t)) Y_1(t) + \\ + B(t) \xi(t)) + \delta(t - kT) (K Y_1(t - T) + \\ + (1 - K) \xi(t)); \\ Y_2(t+T) = \text{Sign}(|Y_1(t) - \xi(t)| - T_3) [Y_2(t) + 1], \end{cases} \quad (3)$$

где

$$B(t) = \delta(Y_2(t) - (q - 1)),$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0, \\ 1, & x = 0; \end{cases}$$

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0; \end{cases}$$

$Y_1(t)$ – результат сравнения шкал времени эталонной и КСЧ;

$$K = 1 - \frac{K_v K_\delta T_{изм}}{K_{дел}};$$

K_v – крутизна элемента подстройки частоты КСЧ; $K_{дел}$ – коэффициент деления ФШВ; K_δ – коэффициент передачи фазового детектора; $t = 0 \cdot T_{изм}; 1 \cdot T_{изм}; 2 \cdot T_{изм}; T = T_{изм}$.

Для внутреннего рубидиевого КСЧ Ч1-84 $K_v = 18,84 \cdot 10^{-3} \frac{1}{В \cdot с}$, $K_{дел} = 10^7$. При этом из уравнения для ФАПЧ в (3) следует, что начальная относительная отстройка частоты КСЧ не должна превышать $\sim 5 \cdot 10^{-10}$.

На рис. 3 приведен график текущей относительной отстройки частоты КСЧ по результатам программного моделирования совместной

системы. Из графика следует, что внутренний КСЧ выйдет на уровень погрешности по частоте $\sim 1 \cdot 10^{-12}$ при периодической часовой коррекции по истечении 7 ч.

Для снижения вносимой приемником-компаратором погрешности измерения относительной отстройки частоты в приборе предусмотрен режим многократных измерений, который заключается в определении набега фазы во времени между средними значениями временного положения секундных импульсов в начале и в конце времени измерения. При этом вносимая погрешность уменьшается в $\sqrt{N/4}$ раз [3] по сравнению с однократным измерением (N – число усредняемых значений интервалов времени между импульсами внутренней ШВ и ШВ ГЛОНАСС).

В приемнике-компараторе ЧК7-56 формирование ШВ и подстройка частоты внутреннего КСЧ осуществляется после приема сигналов ГЛОНАСС в диапазонах L1, L2 и сигналов GPS в диапазоне L1 с учетом линейного изменения частоты внутреннего КСЧ (Ч1-84А). Пример относительной среднесуточной погрешности по частоте приемника-компаратора ЧК7-56 приведен на рис. 4.

3. Технические характеристики приемников-компараторов ГЛОНАСС/GPS

Технические характеристики промышленных приемников-компараторов представлены в таблице.

Таблица

Технические характеристики приемника-компаратора ЧК7-54 и его ближайших отечественных и зарубежных аналогов

Параметры	«Quartzlock A8-M» GPS Time Frequency Standards	Приемник- синхронизатор VCH-311 ф. «Время-Ч»	Приемник-компаратор сигналов ЧК7-54 ННИПИ «Кварц»
1 Относительная погрешность измерения относительной отстройки частоты встроенного или внешнего ОГ	–	$1 \cdot 10^{-12}$ за 1 сут $1 \cdot 10^{-13}$ за 10 сут	$1 \cdot 10^{-12}$ за 1 сут $1 \cdot 10^{-13}$ за 10 сут
2 Входные внешние измеряемые сигналы	–	2,048; 5; 10 МГц; 0,7–3,5 В на 75 Ом	5; 10 МГц; 0,5–1,2 В на 50 Ом
3 Выходные синусоидальные сигналы	1, 5, 10 МГц	10; 2,048 МГц; 1 В на 50 Ом	1; 5; 10 МГц; 0,5–1,2 В на 50 Ом
4 Относительная погрешность по частоте (от внутреннего генератора)	$\pm 5 \cdot 10^{-14}$ через 5 сут	$\pm 2 \cdot 10^{-11}$ через 3 ч; $\pm 7 \cdot 10^{-12}$ через 9 ч; $\pm 3 \cdot 10^{-12}$ через 24ч	$\pm 2 \cdot 10^{-12}$ через 24 ч

Таблица (Продолжение)

Параметры	«Quartzlock A8-M» GPS Time Frequency Standards	Приемник- синхронизатор VCH-311 ф. «Время-Ч»	Приемник-компаратор сигналов ЧК7-54 ННИПИ «Кварц»
5 СКДО выходных сигналов (синусоидальных)	$1 \cdot 10^{-11}$ за 1 с; $2 \cdot 10^{-12}$ за 10с; $4 \cdot 10^{-13}$ за 100с	$\pm 7 \cdot 10^{-12}$ за 10 с; $\pm 2 \cdot 10^{-12}$ за 24 ч	$1 \cdot 10^{-11}$ за 1 с; $6 \cdot 10^{-12}$ за 10 с; $3 \cdot 10^{-12}$ за 100 с
6 Выходной сигнал ШВ	1 Гц (ТТЛ)	1 Гц (ТТЛ)	Осн. и вспомогат. ШВ: 1 Гц (ТТЛ), 50 Ом, $\tau = 10-30$ мкс, сдвиг вспомогат. ШВ с шагом 10 нс
7 Погрешность синхронизации ШВ с образцовой ШВ	± 4 нс (2σ) (СКП)	± 50 нс	$\pm(10-30)$ нс с внешней ШВ
8 Интерфейс	RS-232/422	RS-232	RS-232, КОП
9 Габариты; масса	«2U 19» –	450 × 150 × 340 мм; 10 + 0,3 кг ант.	480 × 160 × 340 мм; 10 + 0,44 кг ант.

В приемнике-компараторе ЧК7-56 ШВ, формируемая прибором, синхронизирована с системной ШВ ГЛОНАСС с погрешностью 50 нс; кроме того, продублированы все выходы прибора, что делает удобным его использование в автоматизированных измерительных системах, например, в автоматизированном рабочем месте проверки навигационной аппаратуры потребителей К6-12.

Заключение

В статье приведены примеры построения современных приемников-компараторов сигналов ГЛОНАСС/GPS. Предложена математическая модель системы синхронизации приемника-компаратора и приведены результаты ее анализа и моделирования. Приведены технические характеристики приемников-компараторов. Показана

возможность уменьшения вносимой погрешности измерения отстройки частоты за счет усреднения измеряемых интервалов времени между импульсами шкал времени приемника и ГЛОНАСС/GPS.

Список литературы

1. К оценке эффективности систем синхронизации электронных часов по эталонным сигналам частоты и времени / К.Г. Кирьянов [и др.] // Измерительная техника. 1995. № 12. С. 24–26.
2. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении / пер. с англ. под ред. Ю.Н. Бакаева и М.В. Капранова. М.: Советское радио, 1978.
3. Алгоритмическое обеспечение системы синхронизации шкалы времени приемника-компаратора сигналов ГЛОНАСС/GPS / В.В. Акулов [и др.] // Труды XIII Международной научно-технической конференции RLNC-2007. Воронеж. Т. 3. С. 1904–1909.

The modern receivers of a reference frequency and time signals (receivers-comparators)

V.V. Akulov, A.I. Pikhteleev

The principles of a construction of a modern receivers of a reference frequency and time signals, included GLO-NASS/GPS signals, are considered in this paper. A mathematical model of the synchronization system of the receiver-comparator was proposed, and the results of its analysis and its modeling was led.

Keywords: receiver-comparator, synchronization system, reference frequency and time signals.