

Анализ цифровых линейных систем автоподстройки частоты высокостабильного генератора по радиосигналу глобальной навигационной системы

В. В. Акулов, Г. П. Пашев

Нижегородское научно-производственное объединение имени М. В. Фрунзе, Нижний Новгород, Россия,
e-mail: akulov06@mail.ru, german.pashev@yandex.ru

Проанализированы варианты построения цифровых линейных систем автоматической подстройки частоты с точки зрения их быстродействия и точности. Приведён вариант технической реализации системы в промышленном приёмнике-компараторе GLONASS/GPS.

Ключевые слова: система автоподстройки частоты, высокостабильный генератор, глобальная навигационная система.

Радиосигнал глобальной навигационной системы (ГНС) ГЛОНАСС имеет очень высокую стабильность частоты на больших (в несколько суток и месяцев) интервалах времени и привязан по частоте к Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–98. В связи с этим находят применение устройства, в которых частота выходного сигнала высокостабильного генератора (малогабаритного кварцевого или квантового рубидиевого стандарта частоты (СЧ)) автоматически подстраивается под частоту радиосигнала ГНС.

Постановка задачи. Для автоматической подстройки частоты (АПЧ) используют различные цифровые системы фазовой или частотной автоподстройки (ФАП или ЧАП) [1–5]. Представ-

ляет интерес анализ вариантов построения систем АПЧ с точки зрения быстродействия и точности работы.

Структурная схема системы АПЧ приведена на рисунке. В приёмнике сигнала из принятого сигнала ГНС выделяется последовательность импульсов частотой 1 Гц – эталонная шкала времени, которая подаётся на цифровой измеритель временных интервалов (ИВИ). Высокочастотный выходной сигнал СЧ с помощью цифрового делителя частоты преобразуется в импульсный сигнал 1 Гц (местная шкала времени), который подаётся на другой вход ИВИ. Результат измерения представляет собой разность шкал времени – цифровую кодовую последовательность

$$\chi_{\text{ИВИ}}(i) = \chi_{\text{СЧ}}(i) - \chi_{\text{ГНС}}(i), \quad (1)$$

где $\chi_{\text{СЧ}}(i)$, $\chi_{\text{ГНС}}(i)$ – положение импульсов 1 Гц сигналов СЧ и ГНС на шкале времени в момент iT , $i = 1, 2, 3 \dots$, T – интервал времени между результатами измерений ИВИ.

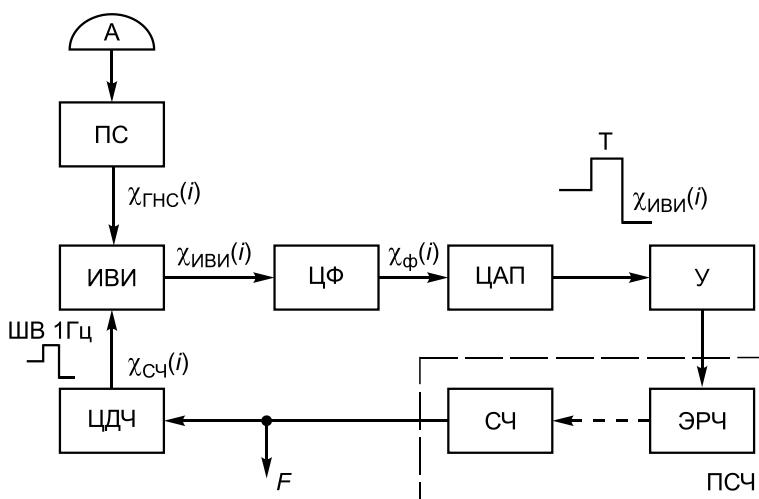
Последовательность $\chi_{\text{ИВИ}}(i)$ поступает на цифровой фильтр, где выполняется сглаживание данных. Последовательность $\chi_{\text{Ф}}(i)$ с выхода цифрового фильтра поступает на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). На выходе ЦАП образуется ступенчатая функция напряжения высотой ступеньки $\chi_{\text{ИВИ}}(i)$ и шириной T . С выхода усилителя (коэффициент усиления K_y) сигнал поступает на элемент регулирования частоты СЧ (коэффициент регулирования K_p). Таким образом, за время, равное длительности одной ступеньки, временное положение импульсов последовательности $\chi_{\text{СЧ}}(i)$ корректируется на величину

$$\chi_{\text{кор}}(i) = \chi_{\text{Ф}}(i-1)k, \quad (2)$$

где $k = K_y K_p T$.

Дискретное уравнение работы системы синхронизации с учётом (1), (2) имеет вид

$$\chi_{\text{СЧ}}(i) = \chi_{\text{СЧ}}(i-1) - k\chi_{\text{Ф}}(i-1). \quad (3)$$



Упрощённая структурная схема системы АПЧ:

А – антенна; ПС – приёмник сигналов ГНС; ИВИ – измеритель временных интервалов; ШВ 1Гц – местная шкала времени; ЦДЧ – цифровой делитель частоты; ЦФ – цифровой фильтр; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ПСЧ – подстраиваемый стандарт частоты; СЧ – кварцевый или квантовый стандарт частоты; У – усилитель; ЭРЧ – элемент регулирования частоты; F – выход частоты

На основе (3) проанализируем некоторые варианты построения системы синхронизации: ФАП 1-го порядка, ФАП 2-го порядка, ФАП с усредняющим фильтром и аналогичные системы ЧАП. При анализе будем считать, что дискретностью современных высоко разрядных ЦАП и высокоточных ИВИ можно пренебречь по сравнению с уровнем шума входных сигналов. Фазовый шум (во временном масштабе) последовательности $\chi_{ГНС}(i)$ на выходе приёмника будем считать белым с дисперсией $\sigma_{\chi ГНС}^2$.

ФАП 1-го порядка. В такой системе не применяется сглаживание, на вход ЦАП поступает последовательность (1) с выхода ИВИ, тогда (3) принимает один из следующих видов:

$$\chi_{СЧ}(i) = \chi_{СЧ}(i-1) - k[\chi_{СЧ}(i-1) - \chi_{ГНС}(i-1)]; \quad (4)$$

$$\chi_{СЧ}(i) = (1-k)\chi_{СЧ}(i-1) + k\chi_{ГНС}(i-1). \quad (5)$$

Для устойчивости системы принимается условие $0 < k < 1$.

При эталонной последовательности $\chi_{ГНС}(i) \equiv 1$ и $\chi_{СЧ}(i) = 0$ при $i \leq 0$ система реагирует по закону переходной функции

$$\chi_{СЧ}(i) = k \sum_{n=0}^i (1-k)^n, \quad (6)$$

которая стремится к единице, когда i стремится к бесконечности. Так как обычно $k \ll 1$, то эквивалентная постоянная времени системы приближённо равна $1/k$. В случае, когда СЧ имеет постоянную отстройку частоты $[\xi] = [1/c]$, шкала времени $\chi_{СЧ}(i)$ отстаёт в установившемся режиме от эталонной шкалы на $\xi T/k$.

Квадрат модуля коэффициента передачи от $\chi_{ГНС}(i)$ к $\chi_{СЧ}(i)$ в частотной области запишем как

$$K(x) = k^2 / [1 - 2(1-k)\cos x + (1-k)^2], \quad (7)$$

где $x = \omega T$.

Используем (7) и определим дисперсию последовательности $\chi_{СЧ}(i)$:

$$\sigma_{СЧ}^2 = (1/\pi) \int_0^\pi \sigma_{\chi ГНС}^2 K(x) dx = \sigma_{\chi ГНС}^2 k / (2-k). \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим систему ФАП рубидиевого опорного генератора Ч1-84 по радиосигналу ГНС ГЛОНАСС со следующими характеристиками: $T=1$ с, $\sigma_{\chi ГНС}=50$ нс, $K_p \approx 2 \cdot 10^{-9}$ 1/сВ, $K_y=1000$. При этом $k=2 \cdot 10^{-6}$, постоянная времени $5 \cdot 10^5$ с, $\sigma_{СЧ}=10^{-3}$.

ФАП 2-го порядка. При плохой помеховой обстановке в точке приёма сигнала ГНС в последовательности $\chi_{ИВИ}(i)$ могут быть большие выбросы и это может нарушить справедливость линейной математической модели системы АПЧ. Поэтому для сглаживания $\chi_{ИВИ}(i)$ можно применить цифровой фильтр 1-го порядка, уравнение которого имеет вид

$$\chi_{\Phi}(i) = \beta \chi_{\Phi}(i-1) + (1-\beta) \chi_{ИВИ}(i), \quad (9)$$

где $0 < \beta < 1$.

Дисперсия последовательности $\chi_{\Phi}(i)$ уменьшается по сравнению с $\sigma_{\chi ГНС}^2$ в $(1-\beta)/(1+\beta)$ раз, а эквивалентная постоянная времени фильтра составляет $(1-\beta)^{-1}$.

Уравнение системы синхронизации (3) с учётом (9) имеет вид

$$\begin{aligned} \chi_{СЧ}(i) = & [1 + \beta - k(1-\beta)] \chi_{СЧ}(i-1) - \\ & - \beta \chi_{СЧ}(i-2) + k(1-\beta) \chi_{ГНС}(i-1). \end{aligned} \quad (10)$$

Для устойчивости системы достаточно выполнить условие [6]:

$$k < 2(1+\beta)/(1-\beta).$$

Квадрат модуля коэффициента передачи системы от $\chi_{ГНС}(i)$ к $\chi_{СЧ}(i)$ в частотной области имеет вид

$$K(x) = \frac{k^2(1-\beta)^2}{1 + A^2 + \beta^2 - 2A(1+\beta)\cos x + 2\beta\cos 2x}, \quad (11)$$

где $A = 1 + \beta - k(1-\beta)$, $x = \omega T$.

На практике $k \ll \beta$ и полоса пропускания системы очень узка по сравнению с полосой пропускания цифрового сглаживающего фильтра (9) и существенно отличается от нуля лишь при $x \ll \pi$. При этом выражение (11) можно упростить как

$$K(x) \approx k^2 / (k^2 - x^2). \quad (12)$$

Проинтегрируем (8) с учётом (12) и получим

$$\sigma_{СЧ}^2 = \sigma_{\chi ГНС}^2 k / 2. \quad (13)$$

ФАП с усредняющим фильтром. Для определения разности между местной и эталонной шкалами времени с высокой точностью результаты единичных измерений ИВИ усредним

$$\chi_{\Phi}(i) = (1/N) \sum_{k=1}^N \chi_{ИВИ}(i-k).$$

При этом дисперсия $\sigma_{\chi ГНС}^2$ уменьшится в N раз.

Очевидно, что результат усреднения можно использовать в системе ФАП частоты СЧ. Разностное уравнение такой системы синхронизации имеет вид

$$\begin{aligned} \chi_{СЧ}(i) - \chi_{СЧ}(i-1) = & \chi_{СЧ}(i-1) - \chi_{СЧ}(i-2) - \\ & - k_1 [\chi_{ГНС}(i-1) - \chi_{СЧ}(i-N-1)], \end{aligned}$$

где $k_1 = k/N$.

Запишем квадрат модуля коэффициента передачи системы:

$$\begin{aligned} K(x) = & 2k_1^2 (1 - \cos Nx) / [1 + A_1 - 4(2 + k_1)\cos x + 2\cos 2x + \\ & + 2k_1\cos(N+1)x - 2k_1(1-k_1)\cos Nx + 2k_1\cos(N-1)x], \end{aligned} \quad (14)$$

где $A_1 = 6 + 4k_1 + 2k_1^2$.

Интегрируем (8) с учётом (14) и находим дисперсию величины $\chi_{СЧ}(i)$. Аналитически выполнить точно это интегриро-

вание затруднительно, поэтому применим численные методы (с помощью ПЭВМ), требующие при исследованиях больших затрат времени. Можно принять во внимание, что коэффициент N усредняющего фильтра обычно много меньше, чем постоянная времени системы $1/k$. Поэтому последовательность $\chi_{\text{СЧ}}(i)$ проходит через фильтр без искажений и (3) принимает вид

$$\chi_{\text{СЧ}}(i) = (1-k)\chi_{\text{СЧ}}(i-1) + k\chi_{\text{ГНС}}(i-1)/N. \quad (15)$$

По форме (15) совпадает с (5) и, следовательно,

$$\sigma_{\text{СЧ}}^2 = \sigma_{\text{ГНС}}^2 k / [N(2-k)].$$

Системы ЧАП. Относительное отклонение частоты сигнала квантового СЧ:

$$\Delta_{\text{СЧ}}(i) = [\chi_{\text{СЧ}}(i) - \chi_{\text{СЧ}}(i-1)]/T. \quad (16)$$

Соответственно

$$\Delta_{\text{ГНС}}(i) = \chi_{\text{ГНС}}(i) - \chi_{\text{ГНС}}(i-1)/T;$$

$$\Delta_{\text{Ф}}(i) = [\chi_{\text{Ф}}(i) - \chi_{\text{Ф}}(i-1)]/T.$$

Уравнение системы ЧАП

$$\Delta \chi_{\text{СЧ}}(i) = \Delta_{\text{СЧ}}(i-1) - k \Delta_{\text{Ф}}(i-1)$$

совпадает по форме с (3). Следовательно, все результаты, полученные в ходе анализа систем ФАП, справедливы и для систем ЧАП при замене символов χ на Δ и с учётом того, что $k = K_y K_p$, а дисперсия величины $\Delta_{\text{ГНС}}(i)$ равна $2\sigma_{\text{ГНС}}^2$.

Из проведённого анализа следует, что по точности наиболее предпочтительна ФАП с усредняющим фильтром. Так как мощность современных микропроцессоров позволяет легко реализовать необходимую обработку данных, быстродействие и точность работы всех систем варьируется и выбирается путём программирования параметров алгоритма обработки данных.

Коэффициент регулирования частоты сигнала СЧ очень мал. Так, для кварцевых и рубидиевых СЧ K_p лежит в пределах 10^{-8} – 10^{-10} 1/сВ. Поэтому постоянная времени системы синхронизации может составлять несколько суток. Для сокращения времени вхождения системы в пределы допустимой погрешности синхронизации применяют начальную установку цифрового делителя частоты сигнала СЧ в нулевое состояние. Для этого применяют импульс эталонной шкалы времени с выхода приёмника сигнала ГНС. При большом уровне помех в сигнале ГНС используют более сложные алгоритмы начальной установки делителя частоты [7].

Техническая реализация АПЧ. Структурная схема промышленного прибора – приёмника-компаратора сигналов ГЛОНАСС/GPS приведена в [8]. Приёмником сигналов ГНС служит приёмоизмерительный модуль К-161 (Российский

институт радионавигации и времени, С.-Петербург). В качестве управляемого КСЧ используется рубидиевый стандарт частоты Ч1-84А (АО «ННПО им. М. В. Фрунзе», Н. Новгород). Функции ИВИ выполняет формирователь шкалы времени совместно с буферной цифровой памятью. Устройство синхронизации предназначено для формирования сигнала частотой 100 МГц, что обеспечивает дискретность измерения временных интервалов 10 нс. Операции ЦАП и усиления выполняются в устройстве управления и индикации. Выходным сигналом этого устройства является аналоговый сигнал для управления частотой СЧ. Остальные устройства имеют вспомогательную роль: коммутации, размножения сигналов и формирования дополнительной шкалы времени. Предусмотрен также режим сличения частоты сигнала внешнего СЧ с частотой сигнала ГНС со среднеквадратической относительной погрешностью измерения $1 \cdot 10^{-12}$. Работой прибора управляет модуль микропроцессора. В приборе реализована система ЧАП с усредняющим цифровым фильтром при $N=10000$. Среднее квадратическое относительное отклонение частоты СЧ менее $1 \cdot 10^{-12}$ при времени измерения 1 сутки, среднее квадратическое отклонение местной шкалы времени на выходе прибора составляет 30–50 нс в зависимости от уровня шумов сигнала ГНС в пункте приёма.

Закключение. В результате проведённого анализа получено, что по точности наиболее предпочтителен вариант построения системы ФАП с усредняющим фильтром. Необходимое быстродействие такой системы реализуется современными микропроцессорными вычислительными средствами. Выведенные формулы расчёта погрешностей различных вариантов систем АПЧ позволяют оценивать их точностные и алгоритмические параметры при практической реализации. Цифровая система АПЧ реализована в современном промышленном приборе – приёмнике-компараторе сигналов ГЛОНАСС/GPS.

Литература

1. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А., Карякин В. Л. и др. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / Под ред. В. В. Шахгильдяна. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.
2. Мартиросов В. Е. Оптимальный приём дискретных сигналов ЦСПИ. М.: Радиотехника, 2010. 208 с.
3. Cessna J. R., Levy D. M. Phase noise and transient times for a binary quantized digital phase-locked loop in which Gaussian noise // IEEE Trans. 1972. V. Com-20. № 2. P. 94–104.
4. Мищенко М. А., Жукова Н. С., Матросов В. В. Возбуждение фазоуправляемого генератора импульсным воздействием // Изв. вузов. ПНД. 2018. Т. 26. № 5. С. 6–19.
5. Алешин К. Н., Матросов В. В., Мишагин К. Г. Синхронизация колебаний наногенератора внешним источником // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 6. С. 8–14.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: пер. с англ. / Под ред. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. Кн. 1. 406 с.

7. Пат. № 2236753 РФ. Приёмник-компаратор сигналов спутниковых радионавигационных систем / Акулов В. В., Шаровский П. Г., Лейфер М. М., Родионов А. В., Воробейчиков А. В., Рахманкин А. В. // Изобретения. Полезные модели. 2004. № 26.

8. Акулов В. В., Шаровский П. Г., Родионов А. В., Лейфер М. М., Новожилов Р. Н., Рыжакова Т. С. Приемник-ком-

паратор сигналов ГЛОНАСС/GPS для автоматизированных систем поверки высокостабильных генераторов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. Т. 3. № 6. С. 21–26.

Дата принятия: 14.12.2018.

The analysis of digital linear automatic frequency control systems of high-stability generator by radio signal of space navigation system

Victor V. Akulov, German P. Pashev

*Nizhny Novgorod Research and Production Association named after M. V. Frunze, Nizhny Novgorod, Russian Federation,
e-mail: akulov06@mail.ru, german.pashev@yandex.ru*

The analysis of digital automatic frequency control systems on transient time and accuracy have been proposed in this paper. Technical realization of system in industrial GLONASS/GPS receiver – comparator is shown.

Key words: auto control frequency system, high-stability generator, space navigation system.