

УДК 621.316

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Д.Л. ШИЛИН, Л.Ю. ШИЛИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 26 мая 2009

Предлагается модель для статистических испытаний систем фазовой синхронизации, которая позволяет определить основные статистические характеристики и произвести анализ и параметрический синтез разрабатываемых устройств при воздействии шумов на систему.

Ключевые слова: импульсные системы фазовой синхронизации, плотность распределения вероятностей

Введение

При проектировании систем фазовой синхронизации необходимо провести анализ статистических характеристик устройства, работающего в условиях воздействия шумов. В данной работе рассматривается метод исследования сложных нелинейных систем, заключающийся в непосредственном моделировании систем при воздействии на них случайных возмущений и обработке полученных результатов. Производя моделирование большого количества процессов, путем соответствующей обработки можно получить необходимые статистические характеристики процесса, такие как стационарная плотность распределения вероятностей выходного сигнала, вероятность срыва синхронизма за указанное время и др.

Модель для статистических испытаний

Структурная схема системы фазовой синхронизации [1], на которую воздействуют шумы $\xi_{\text{вх}}(t)$ и $\xi_{\text{вых}}(t)$ изображена на рис. 1

Для моделирования процессов в системе используются нелинейные кусочно-непрерывные уравнения динамики импульсных систем фазовой синхронизации (ИСФС). Непрерывная линейная часть системы имеет порядок m и характеризуется вектором переменных состояния $X[n] \in R^m$, тогда при учете шумов система будет иметь порядок $m+1$. В пространстве состояний она описывается расширенным вектором состояния $\tilde{X} n$:

$$\tilde{X} n = \begin{bmatrix} X n \\ \dots \\ \varepsilon n \end{bmatrix}.$$

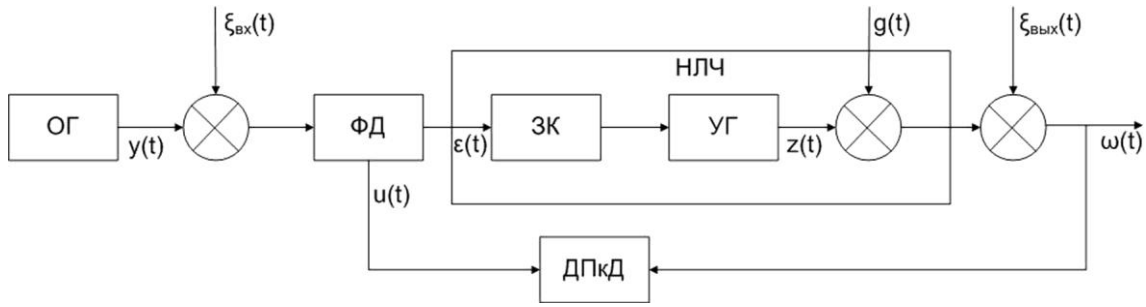


Рис. 1 Структурная схема системы фазовой синхронизации: ОГ — опорный генератор; ФД — фазовый детектор; ЗК — звено коррекции; УГ — управляемый генератор; ДПКД — делитель с переменным коэффициентом деления; $y(t)$ — входной сигнал; $u(t)$ — сигнал из цепи обратной связи; НЛЧ — непрерывная линейная часть; $z(t)$ — выходной сигнал управляемого генератора; $g(t)$ — постоянное воздействие УГ; $\varepsilon(t)$ — сигнал рассогласования; $\omega(t)$ — выходной сигнал системы

Стохастические уравнения системы будут иметь вид:

$$\tilde{X}_{n+1} = F \tilde{X}_n + \theta_{\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вых}}} n, \quad (1)$$

где

$$F \tilde{X}_n = \begin{bmatrix} F_1 \tilde{X}_n \\ \dots \\ F_{m+2} \tilde{X}_n \end{bmatrix},$$

$F_i \tilde{X}_n$ — нелинейные детерминированные функции, $i = \overline{1, m+2}$;

$$\theta_{\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вых}}} n = \begin{bmatrix} \theta_1 \xi_{\text{вх}} n, \xi_{\text{вых}} n \\ \dots \\ \theta_{n+1} \xi_{\text{вх}} n, \xi_{\text{вых}} n \end{bmatrix},$$

$\theta_1 \xi_{\text{вх}} n, \xi_{\text{вых}} n$ — стохастические функции.

При моделировании систем задается отношение шум/сигнал:

$$S_{\text{вх}}(\omega) = 10 \lg(U_{\text{ш}}^2 / U_{\text{вх}m}^2),$$

где $U_{\text{ш}m}$ — амплитудное значение шума; $U_{\text{вх}m}$ — амплитудное значение входного сигнала.

Далее генерируется закон распределения шума. Если действует "белый шум", то генерируется псевдослучайная последовательность в диапазоне $n_{\text{ш}} \in [0, 1]$, которая центрируется и нормируется:

$$U_{\text{ш}bm} = n_{\text{ш}} - 0,5 U_{\text{ш}m}.$$

Затем определяется текущее значение периода $T_{\text{нш}}$:

$$T_{\text{нш}} = T_n \cdot 1 + \alpha_{\text{нш}} / 2\pi, \quad \text{где } \alpha_{\text{нш}} = \arctg U_{\text{ш}bm} / U_{\text{швх}m}. \quad (2)$$

Таким образом, происходит учет шума, воздействующего на входной сигнал. Если шум имеет другой закон распределения, то далее из равномерного закона формируется требуемый закон распределения [1].

В результате, предложенный метод моделирования позволяет получить выходной сигнал ИСФС с учетом воздействия шумов, имеющих требуемый закон распределения.

Результаты статистических испытаний

Наиболее полной статистической характеристикой ИСФС является стационарная плотность распределения вероятностей (ПРВ) выходного сигнала. Исследование стационарной ПРВ основывается на определении значений выходной частоты на каждом периоде работы системы. Отклонение выходной частоты от установившегося значения объясняется воздействием шума на систему. Для построения стационарной ПРВ необходимо установить количество реализаций, определить максимальное значение девиации выходной частоты, задать количество диапазонов частоты для анализа числа реализаций в заданном диапазоне.

В процессе анализа авторами определяется интердецильная ширина ПРВ, которая определяет вероятность попадания в заданный диапазон частот со значением 0,8. Вводится понятие интердецильного затухания — d .

$$d = \frac{\omega_{0,9} - \omega_{0,1}}{\omega^*},$$

где $\omega_{0,9}$ и $\omega_{0,1}$ — верхняя и нижняя границы интердецильной ширины ПРВ; ω^* — установившееся значение выходной частоты.

Эти величины характеризуют частотные свойства исследуемой системы при заданном соотношении шум/сигнал и позволяют судить об отклонении выходной частоты от заданной, а также о сохранении синхронизма в системе.

Авторами произведено исследование синтезатора частот, работающего при воздействии шумов. Шум имеет равномерный закон распределения. На рис. 2 показана стационарная ПРВ при соотношении шум/сигнал на входе $S_{вх} = -20$ дБ, интердецильная ширина $S_d = 5,848 \cdot 10^6$ Гц, интердецильное затухание $d = 2,541 \cdot 10^{-4}$.

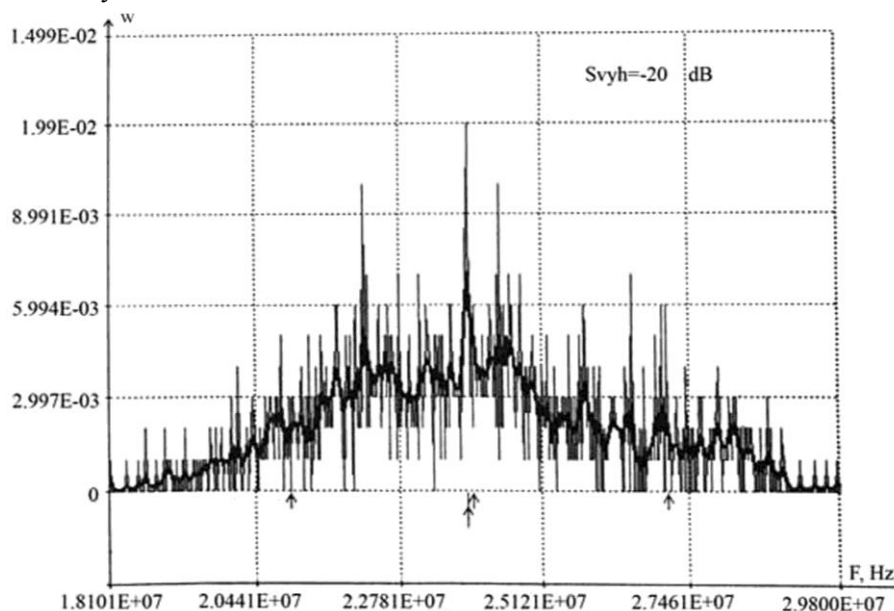


Рис. 2. Стационарная плотность распределения вероятностей

При соотношении на входе шум/сигнал $S_{вх} = -80$ дБ интердецильная ширина составила $S_d = 6,098 \cdot 10^3$ Гц, а интердецильное затухание $d = 2,541 \cdot 10^{-4}$.

Очевидным является то, что система обладает хорошими избирательными свойствами, при увеличении уровня шума на входе системы ухудшается спектральный состав выходного сигнала, но увеличение шума в 10^6 раз увеличивает интердецильную частоту в 10^3 раз.

С целью определения параметров проектируемой системы, обеспечивающих лучшие фильтрующие свойства при заданном уровне шумов, построена зависимость интердецильной ширины ПРВ от уровня шума при различных параметрах непрерывной линейной части системы. На рис. 3 показана зависимость интердецильной ширины от интенсивности шума на входе системы при постоянном уровне шума на выходе $S_{вых} = -40$ дБ. Кривые имеют различный

наклон на трех участках от: -100 дБ до -30 дБ интердецильная ширина в основном определяется уровнем шумов на выходе системы; от -30 дБ до -10 дБ ширина в основном определяется уровнем входного шума; от -10 дБ до 10 дБ в системе отсутствует режим синхронизма, частота выходного сигнала изменяется хаотически в широком диапазоне частот.

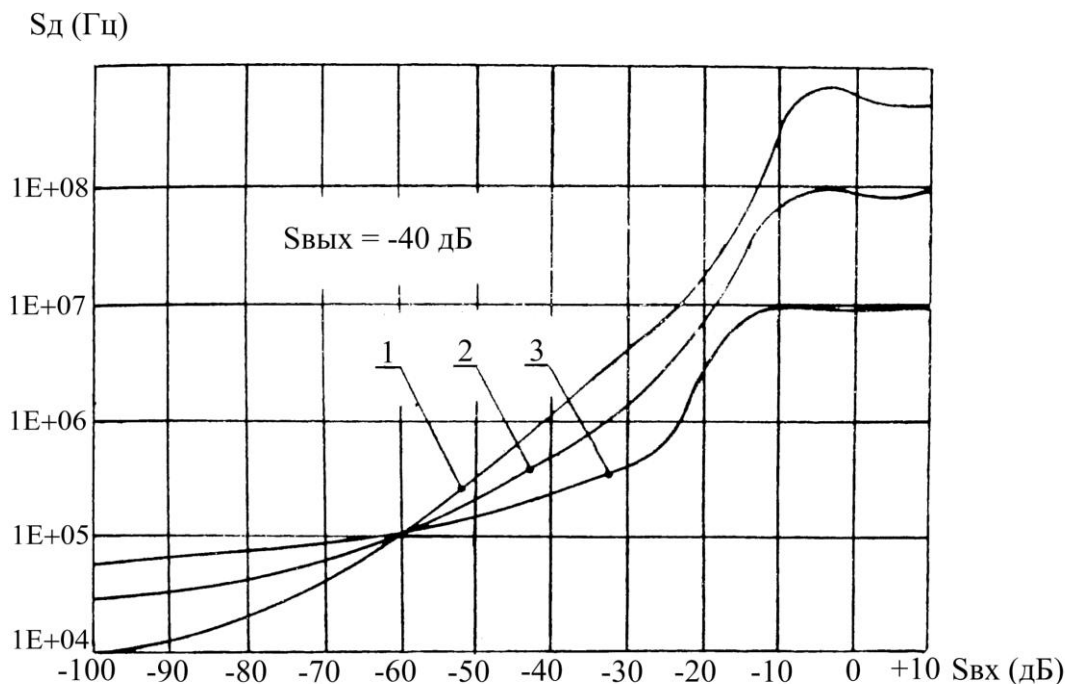


Рис. 3. Зависимость интердецильной ширины от уровня шумов при различных коэффициентах усиления:
 $1 — k_1=5 \cdot 10^7$ Гц/В; $2 — k_1=5 \cdot 10^6$ Гц/В; $3 — k_1=5 \cdot 10^5$ Гц/В

Еще одной из важнейших статистических характеристик ИСФС является вероятность нахождения системы в синхронном режиме на данный момент при различном уровне воздействующего шума. Методика определения этой характеристики заключается в следующем: на математическую модель системы в установившемся режиме подается шум с заданным законом распределения и интенсивностью, затем получаем M_0 решений системы уравнений (1) и (2). Определяем в каждой реализации такт квантования, при котором произошел срыв синхронизации, далее производим расчет вероятности удержания на данном такте квантования P_n .

При этом под срывом синхронизации следует понимать выход координаты фазового рассогласования $\varepsilon(t)$ за пределы апертюры дискриминационной характеристики на время, больше некоторого заданного для данной системы. Однако вероятность возвращения координаты $\varepsilon(t)$ за малое время в область слежения мала, поэтому в наших случаях с большой вероятностью можно утверждать, что первый выход сигнала $\varepsilon(t)$ за пределы апертюры эквивалентен срыву слежения [2].

Авторами исследовалась система слежения, выходная частота составляла 10^9 Гц, коэффициент усиления непрерывной линейной части $K_b=2,5 \cdot 10^6$ Гц/В, коэффициент деления в цепи обратной связи $N_d=1024$, звено коррекции представляло собой фильтр второго порядка. На вход системы подавался шум с различной интенсивностью. На рис. 4 изображена зависимость вероятности удержания системы в синхронном режиме от периода квантования с воздействием шума различной интенсивности.

Сопоставляя результаты исследования по аналитическим выражениям [1] и результаты исследования, приведенные в настоящей статье, можно сделать вывод о высокой достоверности предложенного метода.

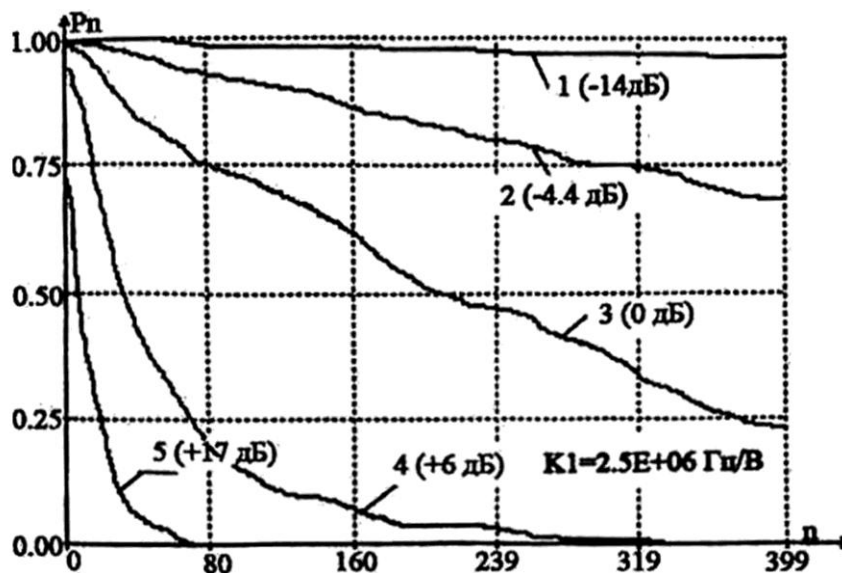


Рис. 4. Вероятность удержания системы в синхронном режиме в зависимости от периода квантования с воздействием шума различной интенсивности: 1 — -14 дБ; 2 — -4,4 дБ; 3 — 0 дБ; 4 — +6 дБ; 5 — +17 дБ

Заключение

Таким образом, предложена модель для статистических испытаний систем фазовой синхронизации, которая позволяет определить основные статистические характеристики и произвести анализ и параметрический синтез разрабатываемых устройств при воздействии шумов на систему.

STATISTICAL DYNAMICS OF PULSE SYSTEMS OF PHASE SYNCHRONISATION

D.L. SHILIN, L.Yo. SHILIN

Заключение

The model for statistical tests of systems of phase synchronization was offered. The model allows to define the basic statistical characteristics and to make the analysis and parametrical synthesis of developed devices at influence of noise on system.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шахтарин Б.И.* Случайные процессы в радиотехнике. М., 2006.
2. *Батура М.П., Кузнецов А.П., Шилин Л.Ю.* Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. Минск, 1993.