

УДК 681.511.4

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Л.Ю. ШИЛИН, Д.Л. ШИЛИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 4 июня 2007*

Широкое использование систем импульсной фазовой синхронизации вызвано их высокой точностью, скоростью, простой технической реализацией. Рассмотрен анализ режимов работы импульсных систем фазовой синхронизации. Определено, что при некоторых условиях в системах могут возникать весьма специфические режимы, которые обусловлены их нелинейными и импульсными свойствами. Такие режимы могут быть использованы как рабочие — работа на кратных частотах, детерминированный хаос, а могут представлять собой нежелательные режимы.

Ключевые слова: фазовая синхронизация, детерминированный хаос.

Введение

Импульсные системы фазовой синхронизации (ИСФС) при правильном проектировании позволяют получить высокую точность, хорошую помехозащищенность при простоте реализации [1]. Однако анализ режимов работы таких систем показывает, что при определенных условиях в системах могут возникать весьма специфические режимы, которые обусловлены нелинейными и импульсными свойствами ИСФС. Такие режимы могут быть использованы как рабочие — работа на кратных частотах, детерминированный хаос, а могут представлять собой нежелательные режимы.

Анализ режимов работы.

На рис. 1 приведена обобщенная схема ИСФС, где ИФД — импульсно-фазовый детектор; ЦФК — цепи фильтрации и коррекции; ОУ — объект управления; НЛЧ — непрерывная линейная часть; ОС — цепь обратной связи, представляющая собой, как правило, делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД).

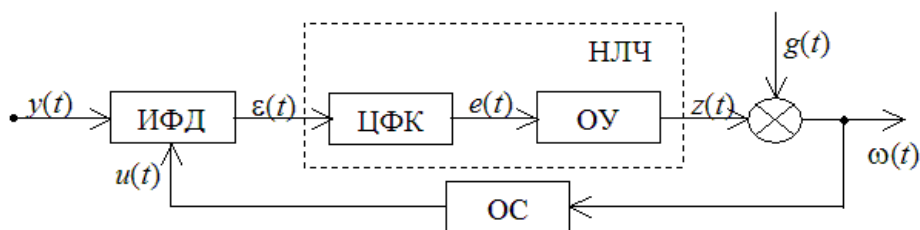


Рис. 1. Структурная схема ИСФС

На рис. 2 приведены временные диаграммы, поясняющие работу ИСФС, где $y(t)$ — входной сигнал; $u(t)$ — сигнал цепи обратной связи; $\varepsilon_T(t)$, $\varepsilon_{B-3}(t)$ — сигнал фазового рассогласования на выходе триггерного ИФД и ИФД типа "выборка-запоминание" соответственно; $z(t)$, $\omega(t)$ — выходной сигнал системы без учета и с учетом возмущающего воздействия $g(t)$.

Следует отметить, что в нормальном установившемся рабочем режиме импульсы входного сигнала и сигнала обратной связи чередуются. Такой режим наблюдается на рис. 2, $a-d$, начиная с четвертого такта входного сигнала. Режим кратного захвата предполагает, что в системе выходная частота в N раз больше частоты входного сигнала. На рис. 2, $a, e-u$ представлен режим, когда за один такт входного сигнала приходит 2 импульса из цепи обратной связи. Для NT -периодического режима характерно то, что за N тактов входного сигнала среднее время прихода импульса ОС совпадает с временем прихода импульса ОС в нормальном рабочем режиме, однако каждый импульс ОС приходит либо с опозданием, либо с опережением. На рис. 2, $a, \kappa-n$ продемонстрирован $2T$ -периодический режим.

Математическая модель ИСФС для анализа вышеперечисленных режимов построена в пространстве переменных состояния.

Положим, что непрерывная часть системы линейна и передаточная функция $W(p)$ имеет вид

$$W(p) = \frac{Q(p)}{M(p)} = \frac{\prod_{i=m+1}^{m+r} (\tilde{T}_i p + 1)}{\prod_{i=1}^m (\tilde{T}_i p + 1)}, \quad (1)$$

где \tilde{T}_i — постоянные времени числителя ($i = m+1, m+r$) и знаменателя ($i = \overline{1, m}$), $r \leq m$. Уравнения состояния НЛЧ с передаточной функцией вида (1) имеют вид

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + B\varepsilon(t), \\ e(t) = CX(t) + d_0\varepsilon(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $X(t)$ — вектор переменных состояния; A — матрица размерности $m \times m$.

$$A = \text{diag}\{p_1, \dots, p_m\}, \quad p_i = -1/\tilde{T}_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (3)$$

векторы $B, C \in R^m$:

$$B = [b_1 \dots b_m], \quad b_i = \left. \frac{Q(p)(\tilde{T}_i p + 1)}{M(p)} \right|_{p = p_i}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (4)$$

$$C = [C_1 \dots C_m], \quad C_i = 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad (5)$$

$$d_0 = \lim_{p \rightarrow \infty} W(p) = \begin{cases} 0, & m > r; \\ \prod_{i=m+1}^{m+r} \tilde{T}_i / \prod_{i=1}^m \tilde{T}_i, & m = r. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему уравнений (2) на временном интервале T (период следования опорных импульсов), получим систему уравнений разомкнутой ИСФС:

$$X(t) = \Phi(t - t_0)X(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t - \lambda)B\varepsilon(\lambda)d\lambda, \quad (7)$$

где t_0 — время прихода опорного импульса;

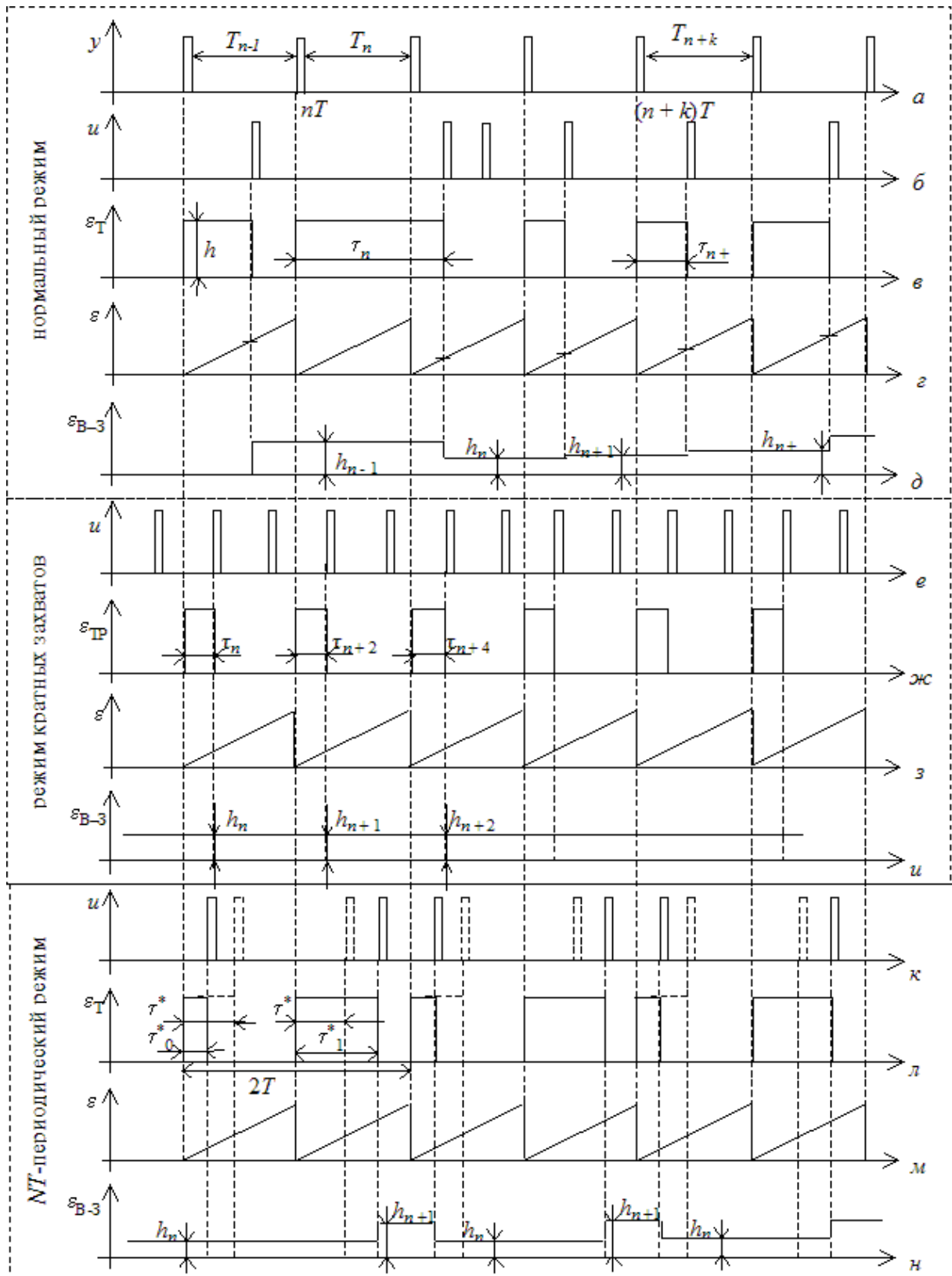


Рис. 2. Временные диаграммы работы ИСФС с различными типами ИФД в разных режимах

$$\Phi(t - t_0) = \exp[A(t - t_0)] = \text{diag}\{\exp(p_1(t - t_0)) \dots \exp(p_m(t - t_0))\}. \quad (8)$$

Интегрирование уравнения (7) для ИСФС с ИФД типа "выборка-запоминание" на интервале времени $t \in [nT + \tau_n; nT + kT + \tau_{n+k}]$ (время между моментами окончания двух соседних широтно-модулированных импульсов) с учетом того, что $\varepsilon(t) = h_n$, примет вид

$$X(t) = \Phi(t - nT - \tau_n)(X(nT) + A^{-1}Bh_n) - A^{-1}Bh_n. \quad (9)$$

Уравнение (7) для ИСФС с ИФД триггерного типа с учетом того, что $\varepsilon(t)$ будет иметь вид

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t \in [nT + \tau_n; nT + kT]; \\ h, & t \in [nT + kT; nT + kT + \tau_{n+k}], \end{cases} \quad (10)$$

запишется:

$$\text{на интервале времени } t \in [nT; nT + \tau_n]$$

$$X(t) = \Phi(t - nT)(X(nT) + A^{-1}Bh) - A^{-1}Bh; \quad (11)$$

$$\text{на интервале времени } t \in [nT + \tau_n; nT + kT]$$

$$X(t) = \Phi(t - nT - \tau_n)X(nT + \tau_n) = \Phi(t - nT)(X(nT) + A^{-1}Bh(1 - \Phi(-\tau_n))); \quad (12)$$

$$\text{на интервале времени } t \in [nT + kT; nT + kT + \tau_{n+k}]$$

$$X(t) = \Phi(t - nT - kT) \times (X(nT + kT) + A^{-1}Bh) - A^{-1}Bh. \quad (13)$$

Уравнение замкнутой ИСФС с интегральной импульсной модуляцией запишется следующим образом:

$$\int_{nT + \tau_n}^{nT + kT + \tau_{n+k}} \omega(t) dt = 2\pi j N_{\text{Д}}, \quad (14)$$

$$\omega(t) = z(t) + g(t) = M(e(t)) + g(t), \quad (15)$$

где $M(e(t))$ — модуляционная характеристика объекта управления, которая, как правило, аппроксимируется полиномом вида

$$M(e(t)) = \sum_{i=1}^m k_i e^i(t). \quad (16)$$

Для описания поведения ИСФС в режиме кратных захватов уравнение замыкания (14) определяется следующим образом [2]:

$$\int_{nT + \tau_n}^{(n+1)T + \tau_{n+1}} \omega(t) dt = 2\pi N N_{\text{Д}}. \quad (17)$$

Для описания поведения ИСФС в NT -периодических режимах уравнения (7)–(14) необходимо рассматривать на всем NT -периоде, т. е. при $t \in [nT + \tau_n; (n+N)T + \tau_{n+N}]$ [3].

В этом случае уравнение (14) имеет вид

$$\int_{nT + \tau_n}^{(n+N)T + \tau_{n+N}} \omega(t) dt = \sum_{l=0}^{N-1} \int_{(n+l)T + \tau_{n+l}}^{(n+l+1)T + \tau_{n+l+1}} \omega(t) dt = 2\pi N N_{\text{Д}}. \quad (18)$$

Данная модель позволила провести анализ ряда систем в различных режимах. Так, на рис. 3 представлены области синхронизма ИСФС с триггерным ИФД в режиме 2-кратных захватов со следующей передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K(\tilde{T}_2 p + 1)}{\tilde{T}_1 p + 1}$$

и параметрами: частота входного сигнала $f_{ог} = 106$ Гц; неуправляемая составляющая частоты ОУ $g = 106$ Гц; амплитуда импульса ТФД $h = 1$ В; коэффициент модуляционной характеристики $K_M = 103$; коэффициент деления в цепи ОС $N_D = 1$; постоянная времени числителя $\tilde{T}_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ с.

Из рис. 3 видно, что области обоих режимов имеют общее подмножество параметров, что свидетельствует о возможности возникновения нежелательных режимов в процессе эксплуатации устройства.

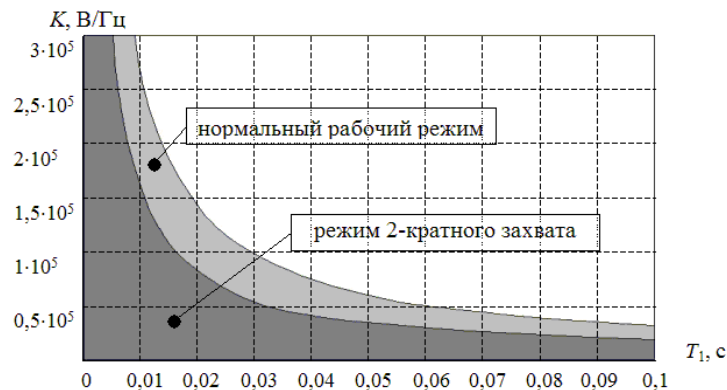


Рис. 3. Область параметров ИСФС с ТФД в режиме кратных захватов $Nf_{ог} = f_u$

На рис. 4 представлены области параметров ИСФС с ИФД типа "выборка-запоминание" в $1T$ -, $2T$ -периодическом режимах со следующей передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K(\tilde{T}_3 p + 1)}{(\tilde{T}_1 p + 1)(\tilde{T}_2 p + 1)}$$

и параметрами: частота опорного генератора $f_{ог} = 10^6$ Гц; неуправляемая составляющая частоты ОУ $g = 10^6$ Гц; коэффициент нарастания выборки $K_B = 10^5$ В/с; коэффициент модуляционной характеристики $K_M = 10^5$; коэффициент деления в цепи обратной связи $N_D = 1$; постоянная времени знаменателя $\tilde{T}_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

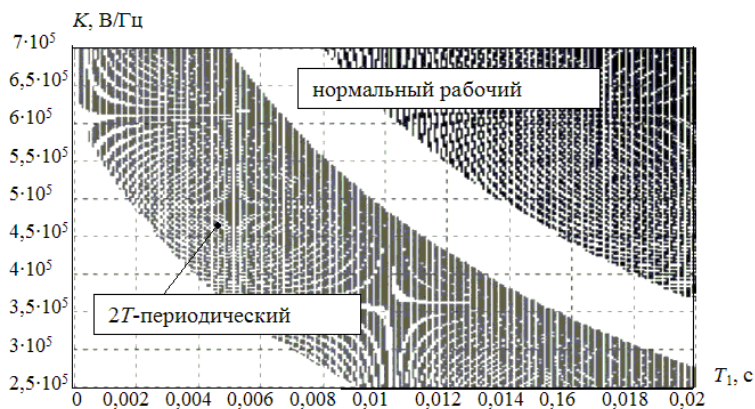


Рис. 4. Области параметров ИСФС с ИФД типа "выборка-запоминание" в нормальном и $2T$ -периодическом режимах

Очевидно, что в данной ИСФС невозможно нежелательное случайное переключение системы между режимами в процессе функционирования из-за отсутствия общего подмножества параметров для нормального и $2T$ -периодического режимов.

Заключение

Данная математическая модель также позволяет проводить анализ ИСФС в динамических режимах. В ходе таковых исследований было обнаружено, что импульсные системы фазовой синхронизации в силу существенной нелинейности ИФД обеспечивают режимы детерминированного хаоса. Такие режимы могут выступать в качестве нежелательных и в качестве рабочих. В последнем случае ИСФС может выступать в качестве системы шифрования с высокой степенью защиты данных [4].

На рис. 5 приведен фазовый портрет ИСФУ с ИФД типа "выборка-запоминание" в устойчивом режиме и в режиме детерминированного хаоса со следующей передаточной функцией и параметрами:

$$W(p) = \frac{K(\tilde{T}_4 p + 1)}{(\tilde{T}_1 p + 1)(\tilde{T}_2 p + 1)(\tilde{T}_3 p + 1)}; \text{ частота опорного генератора } f_{\text{ог}} = 6 \cdot 10^6 \text{ Гц};$$

неуправляемая составляющая частоты ОУ $g = 5 \cdot 10^6 \text{ Гц}$; коэффициент нарастания выборки $K_B = 2 \text{ В/с}$; коэффициент модуляционной характеристики $K_M = 1$; коэффициент деления в цепи обратной связи $N_D = 10$; постоянные времени знаменателя $\tilde{T}_1 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $\tilde{T}_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $\tilde{T}_3 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$; постоянная времени числителя $\tilde{T}_4 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

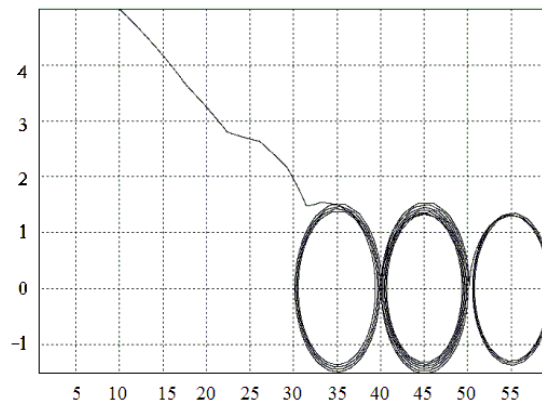


Рис. 5. Фазовый портрет ИСФС в режиме детерминированного хаоса

Фазовый портрет, приведённый на рис. 5, представляет собой странный аттрактор:

сигнал выглядит случайным и движение траектории блуждающее;

фазовый портрет состоит из одной траектории, т.е. траектория проходит через каждую точку аттрактора;

аттрактор характеризуется одновременным существованием счётного множества различных хаотических и регулярных притягивающих подмножеств в ограниченном элементе объёма фазового пространства системы при фиксированных значениях её параметров;

большая чувствительность к начальным внешним условиям, при малейшем изменении данных траектория фазового портрета меняется;

строгая предсказуемость в смысле детерминированности закона эволюции. Данный режим однозначно воспроизводится при фиксированных начальных условиях. Таким образом, в системах со странными аттракторами реализуются режимы детерминированного хаоса, характеризующиеся экспоненциальной неустойчивостью траекторий и фрактальной структурой аттрактора.

THE ANALYSIS OF OPERATING MODES OF PULSE SYSTEMS OF PHASE SYNCHRONIZATION

L.Y. SHILIN, D.L. SHILIN

Abstract

Wide use of pulse systems of phase synchronization is caused by high accuracy, speed, simple technical realization. Pulse and nonlinear properties of these systems complicate process of their designing, and sometimes operation. In particular occurrence of specific modes, which can be considered as useful and as parasitic, is peculiar to these systems. Given article is devoted to ways of research of such modes.

Литература

1. *Кузнецов А.П., Батура М.П., Шилин Л.Ю.* Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. Минск, 1993.
2. *Кузнецов В.П., Шилин Л.Ю., Шилина А.Л.* // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Сер. Энергетика. 2002. № 2. С. 38–45.
3. *Шилина А.Л.* // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Сер. Энергетика. 2002. № 5. С. 34–43.
4. *Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С.* // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 7, С. 1310–1315.