

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

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.

Опыт проектирования и эксплуатации высокоточных систем стабилизации частоты, напряжения, скорости вращения вала электродвигателя показывает, что использование в основе таких устройств импульсных систем фазовой синхронизации (ИСФС) позволяет обеспечить малую погрешность и высокую помехозащищенность при простоте реализации [1]. Однако наряду с неоспоримыми достоинствами данных систем существует также ряд особенностей, которые зачастую могут выступать недостатками. В частности, известны случаи, когда выходная координата может хаотически колебаться в окрестностях рабочей точки сколь угодно долго либо устанавливаться на значениях, кратных входному и др. Данные специфические

режимы обусловлены существенными нелинейными и импульсными свойствами ИСФС. Они могут использоваться как рабочие режимы (например, работа на кратных частотах), а могут представлять собой нежелательные режимы.

Данная статья посвящена описанию метода моделирования ИСФС в специфических режимах.

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).

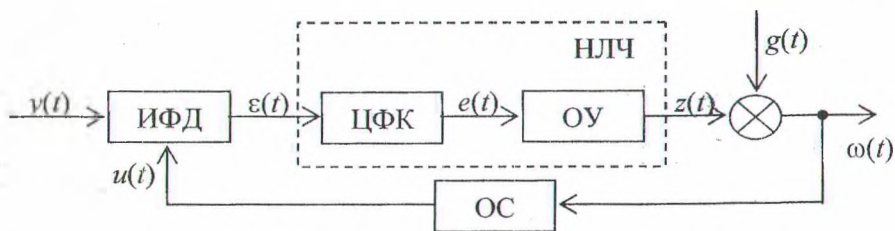


Рис. 1. Структурная схема ИСФС

На рис. 2 приведены временные диаграммы, поясняющие работу ИСФС, где  $y(t)$  – входной сигнал;  $u(t)$  – сигнал цепи обратной связи;  $\varepsilon_T(t)$ ,  $\varepsilon_{\alpha-3}(t)$  – 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, а–д, 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, а, е–и 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 конкретный импульс ОС приходит либо с опозданием, либо с опережением. На рис. 2, а, к–н 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

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

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

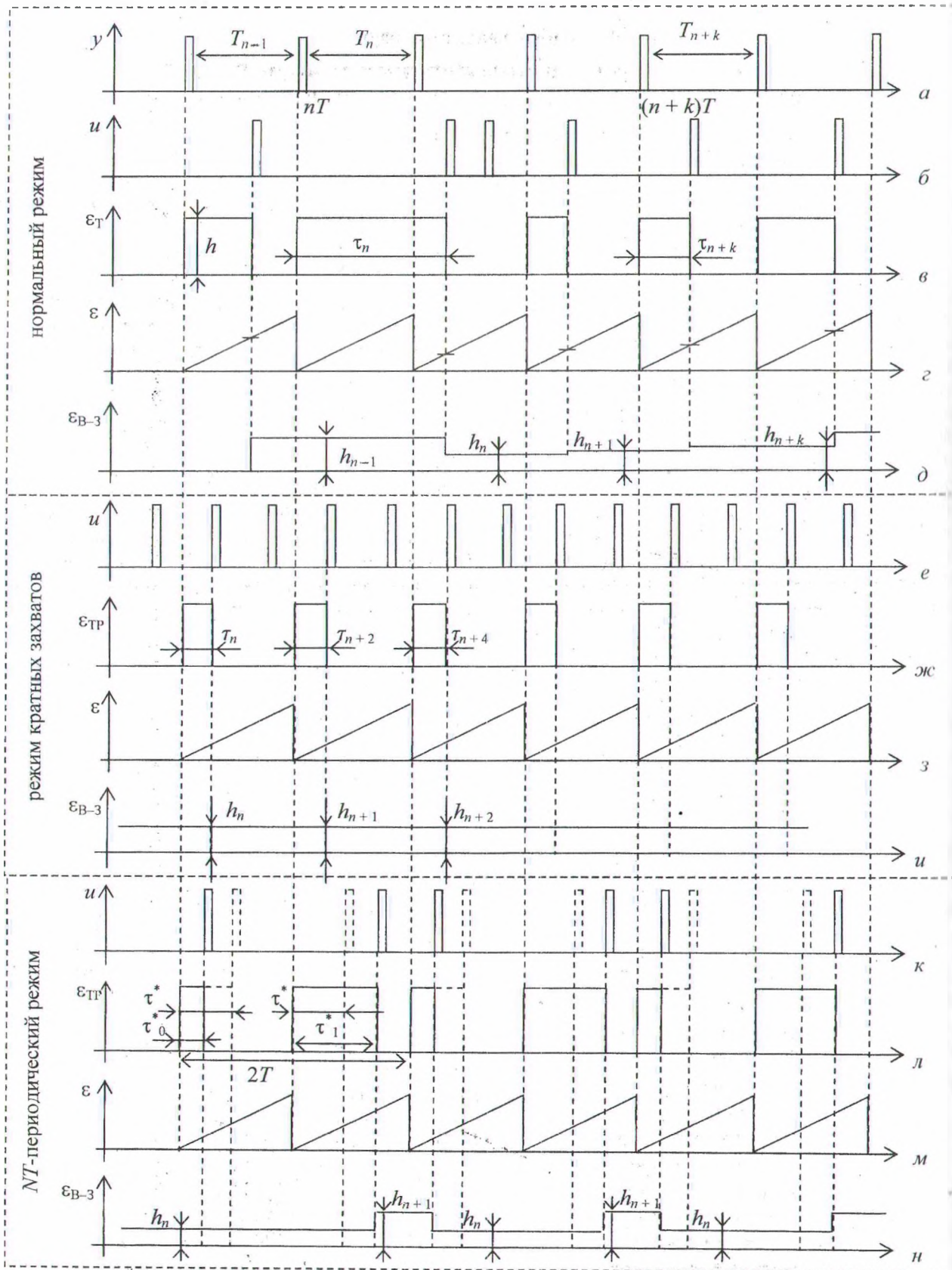


Рис. 2. Временные диаграммы работы ИСФС с различными типами ИФД в разных режимах



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

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

$$A = \text{diag}\{p_1, \dots, p_m\}, p_i = -1/\bar{T}_i, \quad (3)$$

$$i = \overline{1, m};$$

векторы  $B, C \in R^m$ :

$$B = [b_1 \dots b_m], b_i = \frac{Q(p)(\bar{T}_i p + 1)}{M(p)} \Big|_{p=p_i}, \quad (4)$$

$$i = \overline{1, m};$$

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

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

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;

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

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:

- на интервале времени  $t \in [nT; nT + \tau_n]$ :

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

- на интервале времени  $t \in [nT + \tau_n; nT + kT]$ :

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

- 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:

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

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

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]:

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

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

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

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  $f_{ог} = 10^6$  Гц; неуправляемая составляющая частоты ОУ  $g = 10^6$  Гц; амплитуда импульса ТФД  $h = 1$ В; коэффициент модуляционной характеристики

ки  $K_M = 10^3$ ; 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.

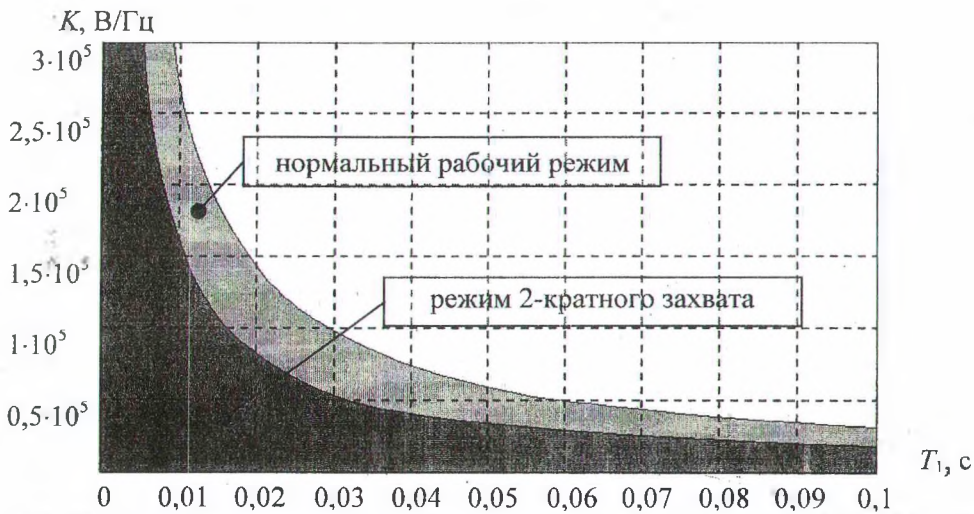


Рис. 3. Область параметров ИСФС с ТФД в режиме кратных захватов  $Nf_{ог} = f_u$

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 нараста-

ния 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.

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.



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



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 могут впадать в режимы детерминированного хаоса. Такие режимы могут выступать в качестве паразитных 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:

$$-W(p) = \frac{K(\tilde{T}_4 p + 1)}{(\tilde{T}_1 p + 1)(\tilde{T}_2 p + 1)(\tilde{T}_3 p + 1)}$$

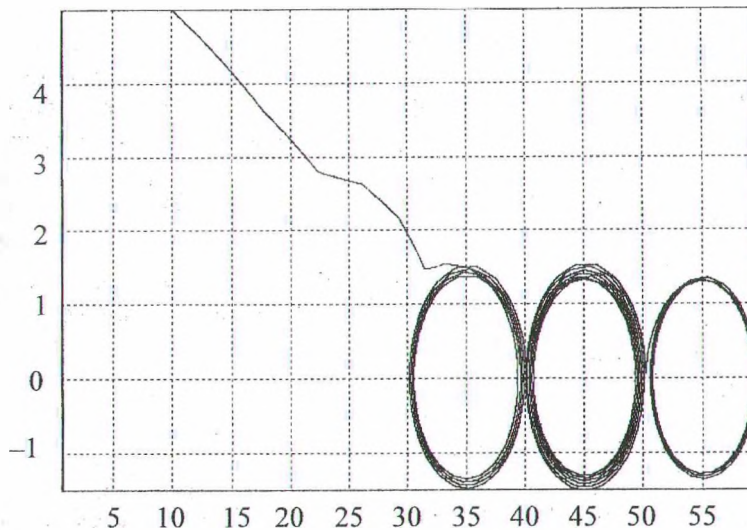


Рис. 5. Фазовый портрет ИСФС в режиме детерминированного хаоса

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

### Литература

1. Кузнецов А. П., Батура М. П., Шилин Л. Ю. Анализ и параметрический синтез импульсных

систем с фазовым управлением – Мн.: Наука і тэхніка, 1993. – 224 с.

2. Кузнецов В. П., Шилин Л. Ю., Шилина А. Л. Построение областей кратных захватов импульсных систем фазовой синхронизации // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ, Энергетика. – Мн., 2002. – № 2. – С. 38–45.

3. Шилина А. Л. Построение областей NT-периодических режимов импульсных систем фазовой синхронизации // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ, Энергетика. – Мн., 2002. – № 5. – С. 34–43.

4. Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С. Передача информации с помощью детерминированного хаоса // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38, № 7. – С. 1310–1315.