

2. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 221–223.

3. Отчет по теме «Испытания разъединителя наружной установки на напряжение 10 кВ, изготавливаемого «Гродноэнерго», для определения его технических характеристик» / ОАО «НИИпроектэлектромонтаж». – М., 2002.

4. Сборник справочных материалов по строительству ВЛ 10 кВ на железобетонных опорах / Минэнерго Республики Беларусь «Белсельэлектросетьстрой». – Мн., 1992.

5. «Работка технических условий на разъединитель наружной установки напряжением 10 кВ и СТП-25-100 кВ·А»: Отчет о НИР. Этап 1. – Мн., БГПА, 2002.

6. ТУ РБ 500030832.002–2001. Провода изолированные для воздушных линий электропередачи на напряжение до 1 кВ.

Поступила 27.04.2002

УДК 681.511.4

ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ NT-ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Инж. ШИЛИНА А. Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Как отмечалось в [1], импульсные системы фазовой синхронизации (ИСФС) обладают высокими точностными и динамическими характеристиками, обеспечивающими данным устройствам широкую область применения. Однако их импульсные и существенно нелинейные свойства порой осложняют не только процесс разработки ИСФС, но и процесс их эксплуатации. В частности, выявлены случаи возникновения специфических режимов работы данных устройств: кратные захваты [2], NT-периодические режимы.

Настоящая статья посвящена исследованию NT-периодических режимов в ИСФС. На основании математической модели ИСФС [1] автор предлагает машинно-ориентированную модель и алгоритм расчета параметров установившегося режима NT-периодических режимов в ИСФС.

Рассмотрим случай 2T-периодического режима для ИСФС с триггерным фазовым детектором (ФД) и с ФД типа «выборка–запоминание». На рис. 1 и 2 представлены временные диаграммы работы рассматриваемых систем для обоих случаев соответственно. Приняты следующие обозначения: y – импульсный сигнал опорного генератора (ОГ); u – сигнал, поступающий на вход ФД из цепи обратной связи; ε – сигнал рассогласования на выходе ФД; e – сигнал на выходе ФНЧ; $u_{\text{тр}}$, $u_{\text{зу}}$ – сигнал на выходе RS-триггера и соответственно на выходе запоминающего устройства, входящих в состав ФД типа «выборка–запоминание». Пунктирной линией на рисунках изображены сигналы, соответствующие нормальной работе ИСФС ($N = 1$).

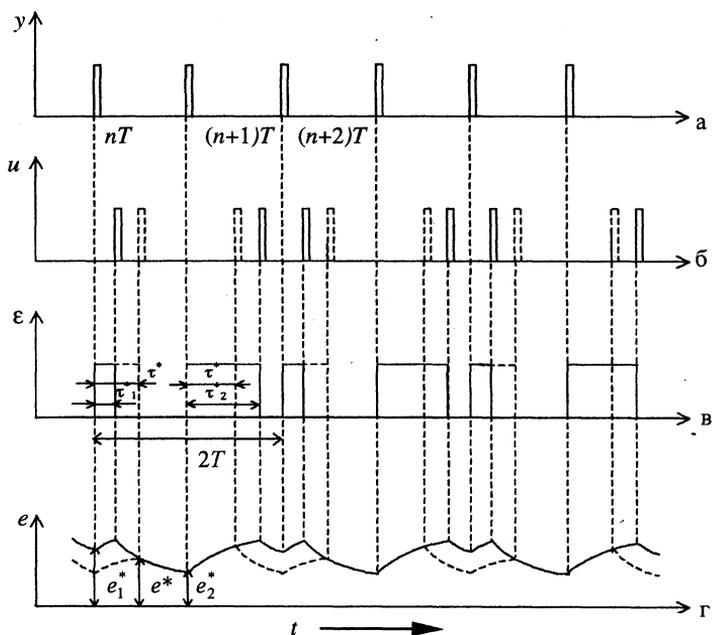


Рис. 1. Временные диаграммы работы ИСФС с триггерным ФД в $2T$ -периодическом режиме

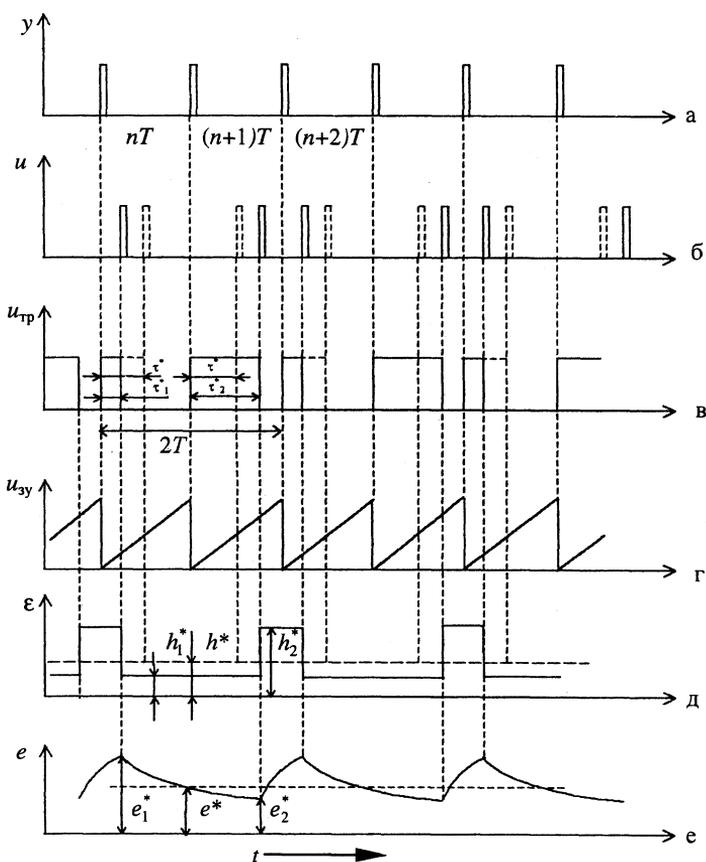


Рис. 2. Временные диаграммы работы ИСФС с ФД типа «выборка-запоминание» в $2T$ -периодическом режиме

Итак, передаточная функция непрерывной линейной части (НЛЧ) ИСФС имеет вид

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

где \tilde{T}_i – постоянная времени. Тогда уравнение состояния НЛЧ ИСФС:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B\varepsilon(t); \\ e(t) &= Cx(t) + D\varepsilon(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $x(t)$ – вектор переменных состояния, а матрица A (размер $m \times m$), векторы B, C (размер $1 \times m$) и коэффициент D определяются параметрами НЛЧ ИСФС [1].

Решая данную систему уравнений в соответствии с [1] и временными диаграммами работы ИСФС в рассматриваемом режиме, получим уравнение разомкнутой ИСФС с триггерным ФД $x(n+N) = f(x(n), \tau_0, \dots, \tau_{N-1})$ в скалярной форме:

$$x_i(n+N) = \exp\left(\frac{NT}{\tilde{T}_i}\right) \left[x_i(n) + b_i h \tilde{T}_i \sum_{p=0}^{N-1} \left[\exp\left(\frac{pT}{\tilde{T}_i}\right) - \exp\left(\frac{pT - \tau_{n+p}}{\tilde{T}_i}\right) \right] \right]. \quad (3)$$

Уравнение замыкания ИСФС на исследуемом NT-периоде имеет вид

$$\int_{nT + \tau_n}^{(n+N)T + \tau_{n+N}} \omega(t) dt = 2\pi N N_D, \quad (4)$$

где N_D – коэффициент деления в цепи обратной связи, а $\omega(t)$ определяется следующим образом:

$$\omega(t) = K C x(t) + d_0 \varepsilon(t) + g, \quad (5)$$

где K – коэффициент усиления НЛЧ ИСФС; g – неуправляемая составляющая частоты объекта управления; $\varepsilon(t)$ определяется в зависимости от типа ФД:

– для триггерного ФД:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} h, & t \in [(n+q)T, (n+q)T + \tau_{n+q}], \quad q = \overline{0, N-1} \\ 0, & t \in [(n+q)T + \tau_{n+q}, (n+q+1)T], \quad q = \overline{0, N-1} \end{cases}; \quad (6)$$

– для ФД типа «выборка–запоминание»:

$$\varepsilon(n) = K_b \tau_{n+q}, \quad q = \overline{0, N-1}, \quad (7)$$

где K_b – коэффициент нарастания выборки.

После операции интегрирования уравнение замыкания ИСФС с триггерным ФД в скалярной форме запишется:

$$\begin{aligned} & K \sum_{i=1}^m \{\tilde{T}_i \sum_{l=0}^{N-1} \{ [x_i(n) + \tilde{T}_i b_i h \sum_{p=0}^l (\exp(pT/\tilde{T}_i) - \exp((pT - \tau_{n+p})/\tilde{T}_i))] \times \\ & \times (\exp((l+1)T + \tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i) - \exp((lT + \tau_{n+l})/\tilde{T}_i)) \} + \\ & + \sum_{l=0}^{N-1} \{ \exp((T + \tau_{n+l+1})/\tilde{T}_i) - \exp((T)/\tilde{T}_i) \} - b_i h \sum_{l=0}^{N-1} \tau_{n+l+1} \} + \\ & + d_0 h \sum_{l=1}^N \tau_{n+l} + g(NT + \tau_{n+N} - \tau_n) = 2\pi N N_D. \end{aligned} \quad (8)$$

В установившемся режиме $x_i(n+N) = x_i(n) = x_i^*$ и определяется по формуле

$$x_i^* = \exp\left(\frac{NT}{\tilde{T}_i}\right) b_i h \tilde{T}_i \sum_{p=0}^{N-1} \left[\exp\left(\frac{pT}{\tilde{T}_i}\right) - \exp\left(\frac{pT - \tau_{n+p}}{\tilde{T}_i}\right) \right] \left/ \left(1 - \exp\left(\frac{NT}{\tilde{T}_i}\right) \right) \right. \quad (9)$$

Зависимость $\tau_{n+q} = f(x(n), \tau_n, \tau_{n+1}, \dots, \tau_{n+q})$, $q = \overline{1, N}$ определяется в соответствии со следующим соотношением:

$$\begin{aligned} & K \sum_{i=1}^m \{\tilde{T}_i \sum_{l=0}^{q-1} \{ [x_i(n) + \tilde{T}_i b_i h \sum_{p=0}^l (\exp(pT/\tilde{T}_i) - \exp((pT - \tau_{n+p})/\tilde{T}_i))] \times \\ & \times (\exp((l+1)T + \tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i) - \exp((lT + \tau_{n+l})/\tilde{T}_i)) \} + \\ & + \sum_{l=0}^{q-1} \{ \exp((T + \tau_{n+l+1})/\tilde{T}_i) - \exp((T)/\tilde{T}_i) \} - b_i h \sum_{l=0}^{q-1} \tau_{n+l+1} \} + \\ & + d_0 h \sum_{l=1}^q \tau_{n+l} + g(qT + \tau_{n+q} - \tau_n) = 2\pi q N_D. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом в установившемся режиме имеет место зависимость

$$\sum_{l=0}^{N-1} \tau_{n+l} = N \frac{2\pi N_D - gT}{Kh}. \quad (11)$$

В случае применения в ИСФС ФД типа «выборка–запоминание» вектор состояния НЛЧ системы в NT-периодическом режиме в скалярной форме будет иметь вид

$$x_i(n+N) = \exp\left(NT/\tilde{T}_i\right) \left[x_i(n) + \tilde{T}_i b_i K_B \left[\sum_{p=0}^{N-1} \exp(pT/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} - \sum_{p=0}^{N-2} \exp((p+1)T/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} \right] - \tau_{n+N+1} \right]. \quad (12)$$

Уравнение замыкания ИСФС с ФД типа «выборка–запоминание» в NT-периодическом режиме в скалярной форме имеет вид

$$\begin{aligned} & K \sum_{i=1}^m \tilde{T}_i \left[\sum_{l=0}^{N-1} \{ [x_i(n) + \tilde{T}_i b_i K_B \left[\sum_{p=0}^l \exp(pT/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} - \sum_{p=0}^{l-1} \exp((p+1)T/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} \right] \} \times \exp(lT/\tilde{T}_i) (\exp(T + \tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i) - \right. \\ & \left. - \exp(\tau_{n+l}/\tilde{T}_i)) + \tilde{T}_i b_i K_B \exp(2(l+1)T/\tilde{T}_i) \times \right. \\ & \left. \times (\tau_{n+l+1} - \tau_{n+l}) (\exp(\tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i) - 1) - \right. \\ & \left. - b_i K_B (\tau_{n+l+1}(T - \tau_{n+l+1}) - \tau_{n+l}(T - \tau_{n+l})) \right] + \\ & + KK_B d_0 \left[\sum_{l=0}^{N-1} \tau_{n+l}(T - \tau_{n+l}) + \sum_{l=1}^N \tau_{n+l}^2 \right] + g(NT + \tau_{n+N} - \tau_n) = 2\pi NN_D. \end{aligned} \quad (13)$$

В установившемся режиме $x_i(n+N) = x_i(n) = x_i^*$ и определяется по формуле

$$x_i^* = \frac{\left(\exp\left(NT/\tilde{T}_i\right) \left[\tilde{T}_i b_i K_B \left[\sum_{p=0}^{N-1} \exp(pT/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} - \sum_{p=0}^{N-2} \exp((p+1)T/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} \right] - \tau_{n+N+1} \right] \right)}{\left(1 - \exp\left(\frac{NT}{\tilde{T}_i}\right) \right)}. \quad (14)$$

Зависимость $\tau_{n+q} = f(x(n), \tau_n, \tau_{n+1}, \dots, \tau_{n+q})$, $q = \overline{1, N}$ определяется в соответствии со следующим соотношением:

$$K \sum_{i=1}^m \tilde{T}_i \left[\sum_{l=0}^{q-1} \{ [x_i(n) + \tilde{T}_i b_i K_B \left[\sum_{p=0}^l \exp(pT/\tilde{T}_i) \tau_{n+p} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{p=0}^{l-1} \exp((p+1)T/\tilde{T}_i) \tau_{n+p}] \times \exp(lT/\tilde{T}_i) (\exp((T + \tau_{n+l+1})/\tilde{T}_i) - \\
& - \exp(\tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i)) + \tilde{T}_i b_i K_B \exp(2(l+1)T/\tilde{T}_i) \times \\
& \quad \times (\tau_{n+l+1} - \tau_{n+l}) (\exp(\tau_{n+l+1}/\tilde{T}_i) - 1) - \\
& - b_i K_B (\tau_{n+l+1}(T - \tau_{n+l+1}) - \tau_{n+l}(T - \tau_{n+l})) \} \} + \\
& + KK_B d_0 \left[\sum_{l=0}^{q-1} \tau_{n+l}(T - \tau_{n+l}) + \sum_{l=1}^q \tau_{n+l}^2 \right] + g(qT + \tau_{n+q} - \tau_n) = 2\pi q N_D.
\end{aligned} \tag{15}$$

При рассмотрении NT-периодических режимов в ИСФС с ФД типа «выборка–запоминание» также имеет место зависимость (11).

В соответствии с разработанной автором математической моделью NT-периодических режимов предложен алгоритм расчета двух-, трехмерных областей параметров НЛЧ ИСФС, при которых в системе возможно возникновение рассматриваемых режимов. Он выглядит следующим образом:

1. Выбор типа ФД, структуры ИСФС (ввод N_D , m , r , K_M , K_B , K , T_i ($i = \overline{1, m+r}$)), периодичности режима N , ввод частоты ОГ f_{OG} и неизменяемой составляющей частоты ОУ g .

2. Определение изменяемых параметров НЛЧ P_i (в качестве таковых могут выступать параметры \tilde{T}_i ($i = \overline{1, m+r}$), K_B , K_M , K , g , f_{OG}); ввод диапазона их изменения $P_{нач}$, $P_{кон}$.

3. $P_i = P_{нач}$.

4. Расчет b_i , d_0 .

5. Расчет x_i^* по формуле (9) для триггерного ФД или (14) для ФД типа «выборка–запоминание», где $\tau_{n+l} = \tau^* \quad \forall l = \overline{0, N-1}$ и рассчитывается по формулам:

$$- \text{для триггерного ФД } \tau^* = \frac{2\pi N_D - gT}{Kh};$$

$$- \text{для ФД типа «выборка–запоминание» } \tau^* = \frac{2\pi N_D - gT}{KK_B T}.$$

6. Рассчитать $\tau_{n+q} = f(x(n), \tau_n, \tau_{n+1}, \dots, \tau_{n+q})$, $q = \overline{1, N}$ по формулам (10), (15) в зависимости от типа ФД для $\tau_0 = 0$ и $\tau_0 = T$.

7. Рассчитать

$$\omega = K_M \left(\sum_{i=1}^m x_i^* + d_0 \sum_{l=0}^{N-1} \varepsilon(l) \right) + g.$$

8. Сравнить $\omega = \frac{2\pi NN_D}{T}$. Если «да», то параметры P_i сохранить, «нет» – переход к пункту 9.

9. $P_i = P_i + \Delta P_i$, переход к пункту 4 до тех пор, пока P_i не достигнет значения $P_{кон}$.

10. Вывести на двух-, трехмерный график области параметров P_i , для которых выполнялось равенство в пункте 8. При этом совокупность параметров P_i , полученных при $\tau_0 = 0$ и $\tau_0 = T$, будет являть границы области параметров НЛЧ ИСФС, при которых в системе возможно возникновение искомого режима.

В соответствии с разработанными автором моделью и алгоритмом анализа ИСФС в NT-периодическом режиме были исследованы система с ФД типа «выборка–запоминание» и НЛЧ с передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

для $N = 1, 2$. Параметры системы были следующие: $f = 10^6$ Гц; $g = 10^6$ Гц; $0,0001 \leq T_1 \leq 0,05$ с; $T_2 = 10^{-7}$ с; $0,00001 \leq T_3 \leq 0,005$ с; $10^5 \leq K \leq 10^6$ В/Гц; $K_B = 10^5$ В/с; $N_D = 1$.

На рис. 3 представлены области параметров НЛЧ ИСФС, при которых в системе возможен нормальный ($N = 1$) и 2Т-периодический режимы. Данные области обозначены цифрами 1 и 2 соответственно. Таким образом, при выборе параметров НЛЧ ИСФС целесообразно избегать их попадания в области 2 во избежание возникновения в системе нежелательных режимов.

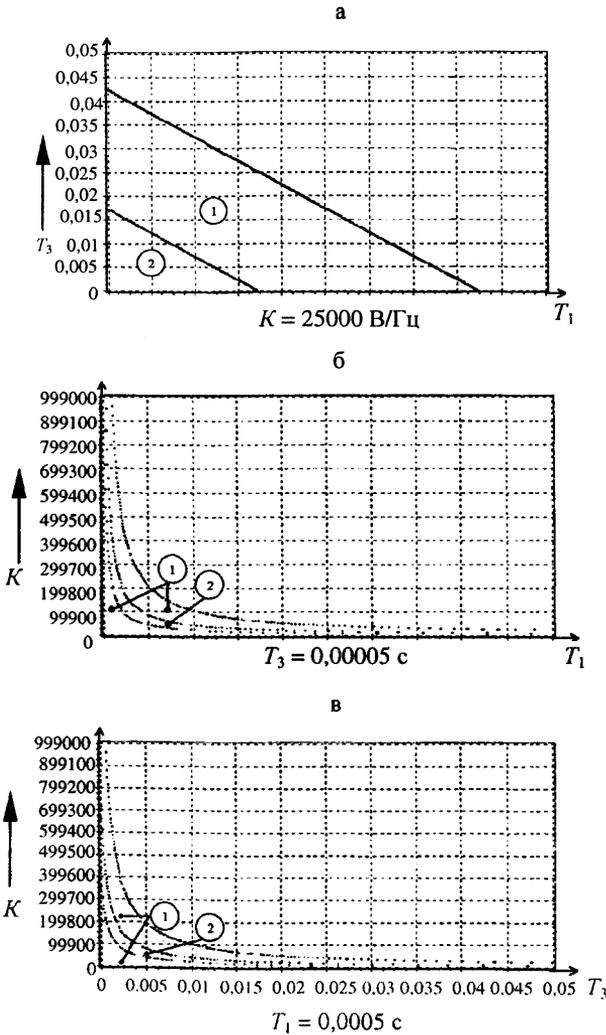


Рис. 3. Двухмерные области 1Т-, 2Т-периодических режимов ИСФС

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А. П., Батура М. П., Шилин Л. Ю. Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. – Мн.: Навука і тэхніка, 1993.
2. Кузнецов В. П., Шилин Л. Ю., Шилина А. Л. Построение областей кратных захватов импульсных систем фазовой синхронизации // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 2. – С. 38–44.

Представлена кафедрой
автоматического управления

Поступила 17.01.2002

УДК 621.3.011.7.08

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЯХ

Докт. техн. наук, проф. **СЫЧИК В. А.**,
канд техн. наук **ПРЕДКО Ю. И.**, инженеры **УЛАСЮК Н. Н.**, **ШУМИЛО В. С.**

Белорусский национальный технический университет

Измерение высоких напряжений постоянного тока производится с помощью высоковольтных электростатических вольтметров, коронирующих высоковольтных измерительных устройств, приборов на базе оптоэлектроники, а также с помощью низковольтных измерительных устройств, подключаемых к измерительному объекту через активный делитель напряжения. Однако методика контроля высоких напряжений, использующая оптоэлектронные измерительные устройства, обладает невысокой точностью, а другие методы контроля предусматривают непосредственный контакт измерительных приборов с высоковольтными цепями, что резко ухудшает условия техники безопасности.

Эффективным методом бесконтактного измерения высоких напряжений постоянного тока является электрический метод, основанный на измерении электростатических полей и их градиентов от заряженных металлических элементов.

Разработана методика бесконтактного измерения высоких напряжений, базирующаяся на положениях электрического метода [1].

Базовая методика точного измерения высоких напряжений постоянного тока путем оценки электростатических полей основана на периодическом экспонировании и экранировании помещенного в электростатическое поле