

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 913544 (СССР). Многодвигательный электропривод / В. В. Романов // Бюл. изобр. – 1982. – № 10.

2. С у д о в ы е статические (полупроводниковые) преобразователи / Ф. И. Ковалев, Г. П. Мосткова, А. Ф. Свиридов, В. Ф. Шукалов. – Л.: Судостроение, 1965. – С. 77–79.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 5.11.2001

УДК 681.511.4

## ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ КРАТНЫХ ЗАХВАТОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Доктора техн. наук КУЗНЕЦОВ В. П., ШИЛИН Л. Ю.,  
инж. ШИЛИНА А. Л.

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники*

В процессе эксплуатации импульсных систем фазовой синхронизации (ИСФС) выявлены случаи возникновения специфических режимов работы: NT-периодические режимы, кратные захваты [1]. Данные явления могут возникать случайным образом и нарушать нормальную работу системы. Поэтому важно на этапе проектирования ИСФС рассмотреть возможность появления в системе таких режимов и исключить условия их возникновения.

Настоящая статья посвящена исследованию кратных захватов в ИСФС. Используя имеющийся опыт исследования систем, построенных на принципе фазового управления [2] и данных режимов [3], авторы предлагают машинно-ориентированную математическую модель расчета параметров установившегося режима кратных захватов в ИСФС.

Рассмотрим общий случай (структурная схема ИСФС с различными типами импульсных фазовых детекторов и временные диаграммы работы данных систем приведены в [2]): положим, что в режиме синхронизма частота импульсов опорного генератора (ОГ)  $f_{OG}(t)$  в целое число раз больше или меньше частоты импульсов на выходе ИСФС  $f_n(t)$ . На рис. 1 представлены временные диаграммы работы системы для двух случаев:

- $2f_n = f_{OG}$ , частота следования импульсов ОГ в 2 раза больше частоты импульсов выходного сигнала;
- $f_n = 2f_{OG}$ , частота следования импульсов ОГ в 2 раза меньше частоты импульсов выходного сигнала.

В обоих случаях частота следования выходных импульсов  $\varepsilon(t)$  определяется наименьшей из частот сигналов  $f_n(t)$  и  $f_{OG}(t)$ . Это объясняется принципом работы импульсного фазового детектора (ИФД) как триггерного, так и типа «выборка–запоминание».

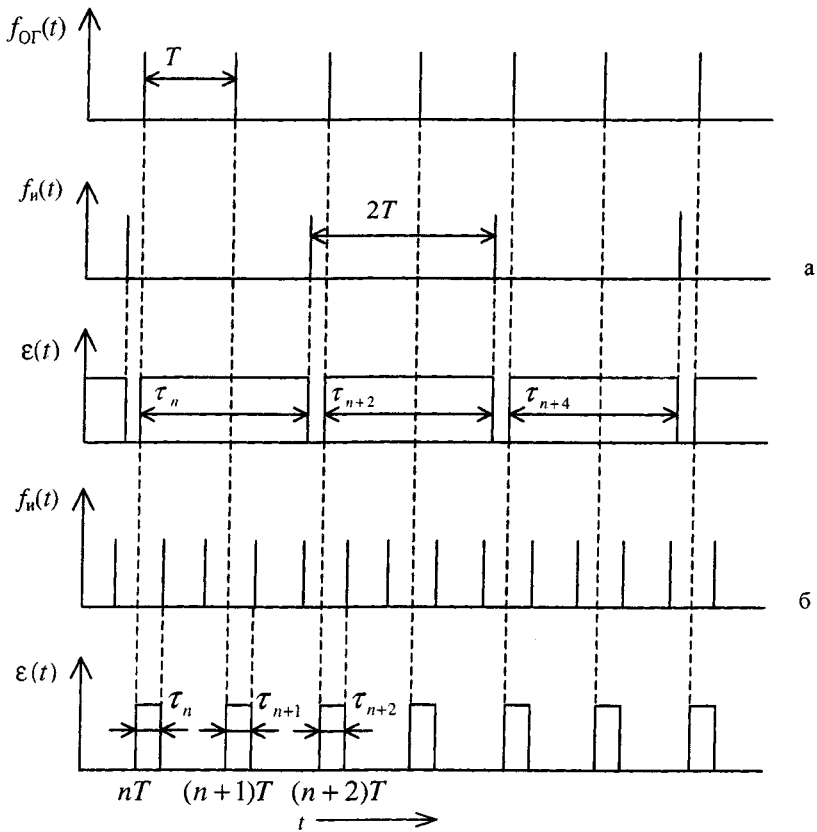


Рис. 1. Временные диаграммы работы ИСФС в режиме кратных захватов

Передаточная функция непрерывной линейной части (НЛЧ) ИСФС имеет вид

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

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 [2].

Для создания алгоритма расчета параметров режима кратного захвата рассмотрим следующие варианты математической модели.

1. Режим  $f_{\text{ог}}(t) = Nf_{\text{и}}(t)$ , где  $N$  – кратность захвата (рис. 1а –  $N = 2$ ):
  - 1.1) тип ИФД – триггерный;
  - 1.2) тип ИФД – «выборка–запоминание».
2. Режим  $Nf_{\text{ог}}(t) = f_{\text{и}}(t)$  (рис. 1б –  $N = 2$ ):
  - 2.1) тип ИФД – триггерный;
  - 2.2) тип ИФД – «выборка–запоминание».

Реакция НЛЧ для варианта 1.1 в скалярной форме запишется

$$x_i(n+N) = \exp\left(\frac{-NT}{\tilde{T}_i}\right) \left[ x_i(n) - \left( 1 - \exp\left(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i}\right) \right) b_i \tilde{T}_i h \right], \quad (3)$$

где  $h$  – амплитуда импульса  $\varepsilon(t)$ .

Уравнение замыкания имеет вид

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

где  $N_{\text{д}}$  – коэффициент деления в цепи обратной связи, а  $\omega(t)$  определяется следующим образом:

$$\omega(t) = K C x(t) + d_0 \varepsilon(t) + G,$$

где  $K$  – коэффициент усиления НЛЧ ИСФС;  $G$  – неуправляемая составляющая частоты генератора.

После операции интегрирования уравнение замыкания в скалярной форме запишется

$$\sum_{i=1}^m [\tilde{T}_i [1 - \exp(\frac{-\tau_{n+N}}{\tilde{T}_i})]] [x_i(n+N) - b_i h \tilde{T}_i] - \tau_{n+N} (Kh + G) + \varphi_n N_{\text{д}} = 2\pi N N_{\text{д}}. \quad (4)$$

Уравнение набега фазы

$$\varphi_n = \frac{1}{N_{\text{д}}} \int_{nT+\tau_n}^{(n+N)T} \omega(t) dt$$

после операции интегрирования в скалярной форме запишется

$$\varphi_n = \frac{1}{N_{\text{д}}} \left[ \sum_{i=1}^m [\tilde{T}_i (\exp(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i}) - \exp(\frac{-T}{\tilde{T}_i}))] [x_i(n) - (1 - \exp(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i})) b_i h \tilde{T}_i] + G(NT - \tau_n) \right]. \quad (5)$$

Параметры установившегося режима кратного захвата определяются по (3)–(5) из условий  $x_i(n) = x_i(n+N) = x^*$ ,  $\tau_n = \tau_{n+2} = \tau^*$ ,  $\varphi_n = \varphi_{n+2} = \varphi^*$  и имеют вид:

$$x_i^* = \frac{b_i h \tilde{T}_i \exp(-NT)(\exp(-\tau^*) - 1)}{1 - \exp(-NT)}; \quad (6)$$

$$\tau^* = \frac{2\pi N_D - GNT}{Kh}. \quad (7)$$

При этом:

$$(N-1)T < \tau^* < NT; \quad (8)$$

$$\varphi^* = 2\pi - \frac{1}{N_D} \tau^* \omega^*; \quad (9)$$

$$\omega^* = \frac{2\pi N_D}{T}. \quad (10)$$

Для варианта 1.2 реакция НЛЧ ИСФС в скалярной форме имеет вид

$$x_i(n+N) = \exp\left(\frac{-(NT + \tau_{n+N} - \tau_n)}{\tilde{T}_i}\right)(x_i(n) - b_i \tilde{T}_i h) + b_i h_n \tilde{T}_i, \quad (11)$$

где  $h_n = K_B \tau_n$ ,  $K_B$  – коэффициент нарастания выборки ИФД.

Уравнение замыкания в скалярной форме запишется

$$\sum_{i=1}^m (\tilde{T}_i (\exp\left(\frac{-NT + \tau_{n+N} - \tau_n}{\tilde{T}_i}\right) - 1)(b_i \tilde{T}_i h_n - x_i(n)) + (Kh_n + G)(NT + \tau_{n+N} - \tau_n) + 2\pi N_D = 0, \quad (12)$$

а уравнение набег фазы выглядит следующим образом:

$$\varphi_n = \frac{1}{N_D} \left[ \sum_{i=1}^m (\tilde{T}_i (1 - \exp\left(\frac{-(NT - \tau_n)}{\tilde{T}_i}\right))(x_i(n) - b_i \tilde{T}_i h_n)) + (Kh_n + G)(NT - \tau_n) \right]. \quad (13)$$

Из (11)–(13) определяются параметры установившегося режима кратного захвата:

$$x_i^* = -\tilde{T}_i b_i K_B \tau^*; \quad (14)$$

$$\tau^* = \frac{2\pi N_D - GNT}{K K_B T}. \quad (15)$$

При этом:

$$(N-1)T < \tau^* < NT; \quad (16)$$

$$\varphi^* = 2\pi - \frac{1}{N_D} \tau^* \omega^*; \quad (17)$$

$$\omega^* = \frac{2\pi N_D}{T}. \quad (18)$$

Варианты 2.1 и 2.2 соответствуют рис. 1б, когда выходная частота  $f_n(t)$  в  $N$  раз больше частоты ОГ. Для варианта 2.1 уравнение состояния разомкнутой ИСФС в скалярной форме имеет вид

$$x_i(n+1) = \exp\left(\frac{-T}{\tilde{T}_i}\right)[x_i(n) - [1 - \exp\left(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i}\right)]b_i\tilde{T}_ih]. \quad (19)$$

Уравнения замыкания и набега фазы соответственно запишутся:

$$\sum_{i=1}^m [\tilde{T}_i [1 - \exp\left(\frac{-\tau_{n+1}}{\tilde{T}_i}\right)] [x_i(n+1) - b_i h \tilde{T}_i] - \tau_{n+1} (Kh + G) + \varphi_n N_D = 2\pi N N_D; \quad (20)$$

$$\varphi_n = \frac{1}{N_D} \left[ \sum_{i=1}^m [\tilde{T}_i (\exp\left(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i}\right) - \exp\left(\frac{-T}{\tilde{T}_i}\right))] [x_i(n) - (1 - \exp\left(\frac{-\tau_n}{\tilde{T}_i}\right)) b_i h \tilde{T}_i] + G(T - \tau_n) \right]. \quad (21)$$

Параметры установившегося режима имеют вид:

$$x_i^* = \frac{b_i \tilde{T}_i h (1 - \exp\left(\frac{-\tau^*}{\tilde{T}_i}\right))}{1 - \exp\left(\frac{-T}{\tilde{T}_i}\right)}; \quad (22)$$

$$\tau^* = \frac{(2\pi N N_D - GT)}{Kh}; \quad (23)$$

$$0 < \tau^* < \frac{T}{N}; \quad (24)$$

$$\omega^* = \frac{2\pi N N_D}{T}; \quad (25)$$

$$\varphi^* = 2\pi - \frac{1}{N_D} \tau^* \omega^*. \quad (26)$$

Вариант 2.2 описывается следующими уравнениями в скалярной форме:

- реакция НЛЧ ИСФС

$$x_i(n+1) = \exp(-(T + \tau_{n+1} - \tau_n))(x_i(n) - \tilde{T}_i b_i h_n) + \tilde{T}_i b_i h_n; \quad (27)$$

- замыкания

$$\sum_{i=1}^m \left[ \tilde{T}_i \left( \exp\left(\frac{-(T + \tau_{n+1} - \tau_n)}{\tilde{T}_i}\right) - 1 \right) (b_i \tilde{T}_i h_n - x_i(n)) \right] + (Kh_n + G)(T + \tau_{n+1} - \tau_n) = 2\pi N N_D; \quad (28)$$

- набега фазы

$$\varphi_n = \frac{1}{N_D} \left[ \sum_{i=1}^m [\tilde{T}_i (1 - \exp\left(\frac{-(T - \tau_n)}{\tilde{T}_i}\right)) (x_i(n) - b_i h_n \tilde{T}_i)] + (Kh_n + G)(T - \tau_n) \right]. \quad (29)$$

Уравнения для расчета параметров установившегося режима:

$$x_i^* = -\tilde{T}_i b_i K_B \tau^*; \quad (30)$$

$$\tau^* = \frac{(2\pi N N_D - GT)}{K K_B T}; \quad (31)$$

$$0 < \tau^* < \frac{T}{N}; \quad (32)$$

$$\omega^* = \frac{2\pi N N_D}{T}; \quad (33)$$

$$\varphi^* = 2\pi - \frac{1}{N_D} \tau^* \omega^*. \quad (34)$$

На основании полученной математической модели создан алгоритм расчета двух- и трехмерных областей параметров НЛЧ ИСФС, при которых возможно возникновение кратных захватов.

1. Ввод варианта расчета 1.1–2.2, кратности захвата  $N$ , параметров НЛЧ ИСФС ( $\tilde{T}_i$ ,  $K_B$ ,  $K$ ,  $G$ ,  $N_D$ ).

2. Ввод параметров рассчитываемой области:  $P_1$ ,  $P_2$  (коэффициенты усиления, постоянные времени НЛЧ ИСФС).

3. Выбор диапазона исследования параметров рассчитываемой области:  $\Delta P_i$ .

4. Присвоение  $\tau^*$  начального значения из диапазона:

$$\text{для режима } Nf_{ог} = f_{и} - \tau \in (0; \frac{T}{N});$$

$$\text{для режима } f_{ог} = Nf_{и} - \tau \in ((N-1)T; NT).$$

5. Присвоение начальных значений исследуемым параметрам  $P_i$ .

6. Расчет установившихся параметров режима  $x^*$ .

7. Расчет  $\omega(t) = K(Cx^* + d_0 \varepsilon(t)) + G$ .

8. Проверка:

$$\text{для режима } Nf_{ог} = f_{и} - \omega(t) = \frac{2\pi N_D N}{T};$$

$$\text{для режима } f_{ог} = Nf_{и} - \omega(t) = \frac{2\pi N_D}{T}.$$

Если «да», то параметры  $P_1$ ,  $P_2$  сохранить.

9. Проверка:  $P_i = P_{i\text{кон}}$ . Если «да», то переход к шагу 12, если «нет» – к шагу 10.

10. Присвоение  $P_i = P_i + \Delta P_i$ .

11. Переход к шагу 6.

12. Присвоение  $\tau^* = \tau_{\text{кон}}^*$ , и переход к шагу 5.

13. Конец.

Авторами была исследована ИСФС с передаточной функцией

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

и ИФД типа «выборка-запоминание» в режимах  $Nf_{\text{ОГ}} = f_{\text{и}}$  и  $f_{\text{ОГ}} = Nf_{\text{и}}$  для  $N = \overline{1,3}$ . Параметры системы:  $f = 10^6 \text{ Гц}$ ;  $G = 10^6 \text{ Гц}$ ;  $N_{\text{д}} = 1$ ;  $K_{\text{в}} = 10^5 \text{ В/с}$ .

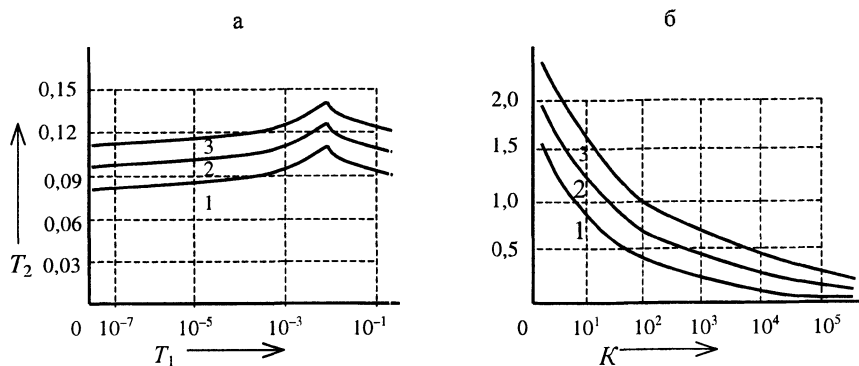


Рис. 2. Области кратных захватов для режима  $f_{\text{ОГ}} = Nf_{\text{и}}$ :  
а -  $K = 10^3 \text{ В/Гц}$ ; б -  $T_1 = 5 \times 10^{-6} \text{ с}$

На рис. 2, 3 представлены области параметров НЛЧ ИСФС, при которых в системе возможны кратные захваты  $f_{\text{ОГ}} = Nf_{\text{и}}$  и  $Nf_{\text{ОГ}} = f_{\text{и}}$ . На обоих рисунках области 1 соответствуют нормальному режиму работы  $N=1$ , а области 2 и 3 – двух- и трехкратному захвату. Таким образом, при выборе параметров НЛЧ ИСФС целесообразно не допускать их попадания в области 2 и 3 во избежание возникновения в системе нежелательных режимов.

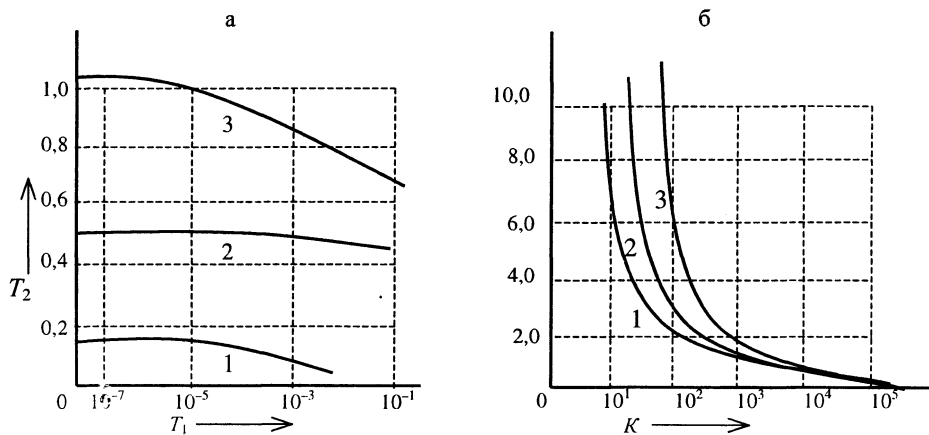


Рис. 3. Области кратных захватов для режима  $Nf_{\text{ОГ}} = f_{\text{и}}$ :  
а -  $K = 10^3 \text{ В/Гц}$ ; б -  $T_1 = 5 \times 10^{-6} \text{ с}$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин Л. Ю., Кузнецов А. П., Свито И. Л. Моделирование процессов в системах с интегральной ШИМ в режиме частотного детектирования // Радиотехника. – 1984. – № 6. – С. 28–31.
2. Кузнецов А. П., Батура М. П., Шилин Л. Ю. Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. – Мн.: Навука і тэхніка, 1993.
3. Кузнецов В. П., Николаев А. В., Саликов Л. М. Синхронизации электроприводов с широтно-импульсным управлением на кратных частотах // Электромеханика. – 1973. – № 9. – С. 1025–1031.

Представлена кафедрой  
теоретических основ электротехники

Поступила 5.11.2001