



3. А.с. 1619229 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина. Б.И. 1991. №1.
4. А.с. 1631515 (СССР). Система автоматического управления для астатических объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина, И.И. Кравченко. Б.И. 1991. №8.
5. А.с. 1667001 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием /Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина. Б.И. 1991. №28.
6. Еремин Е.Л., Горбина Н.Н. Локальные адаптивные системы управления уровнем воды в магистральных каналах //Совершенствование методов и средств автоматизации гидромелиоративных систем. Бишкек: Кыргыз. сельхоз. ин-т, 1994.
7. Фрадков А.Л. Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных выхода //Докл. РАН. 1994. Т. 337. №5.
8. Andrievsky B.R., Fradkov A.L., Stotsky A.A. Shunt compensation for indirect sliding-mode adaptive control //Proc. of 13th Triennial World Congress IFAC. San Francisco. USA. 1996.
9. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 2000.
10. Еремин Е.Л., Цыкунов А.М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.

УДК 62_506.1

© 2001 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,
Л.В. Ильина

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ

Излагается метод построения беспойсковой самонастраивающейся системы идентификации параметров априорно неопределенного динамического объекта с использованием фильтра переменных состояний и специального организованного генератора сигнала идентификации.

Введение

Известно, что в условиях априорной неопределенности синтез контура адаптивной параметрической идентификации устойчивых объектов возможен только тогда, когда доступны измерению его переменные состояния. В противном случае для решения этой проблемы необходимо применять некоторые дополнительные меры.

В статье рассматривается один из возможных подходов к решению задачи об адаптивной идентификации параметров динамических объектов с относительной степенью передаточной функции $-k > 1$. Суть этого подхода состоит в том, что к объекту идентификации (ОИ) подключаются: во-первых, со стороны входа – генератор сигнала идентификации (ГСИ), во-вторых, на выходе ОИ – фильтр переменных состояний (ФПС). При этом, как будет показано, удастся получить оценки элементов вектора состояний ОИ с помощью так называемого эквивалентного объекта идентификации (ЭОИ), состоящего из последовательного соединения трех элементов – ГСИ, ОИ и ФПС.

Структура и математическое описание системы

Рассматривается ОИ, описываемый уравнением входа-выхода

$$a(p)y(t) = b(p)u(t), \quad a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0, \quad (1)$$

$$b(p) = b_0, \quad a_i, b_0 = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, n}$$

и функционирующий в условиях априорной неопределенности вида

$$a_i = a_i(\xi), \quad i = \overline{1, n}, \quad b_0 = b_0(\xi), \quad \xi \in \Xi, \quad (2)$$

где $y(t) \in R$ – измеряемый выход ОИ; $u(t) \in R$ – входной сигнал ОИ, формируемый ГСИ; $a(p)$ – гурвицев полином; $k = \deg a(p) - \deg b(p) = n$; p – оператор дифференцирования; ξ – набор неизвестных параметров, значения которых принадлежат известному множеству Ξ . Структура ОИ (1), представленная в виде *Simulink*-диаграммы для случая $n = 3$, показана на рис. 1б.

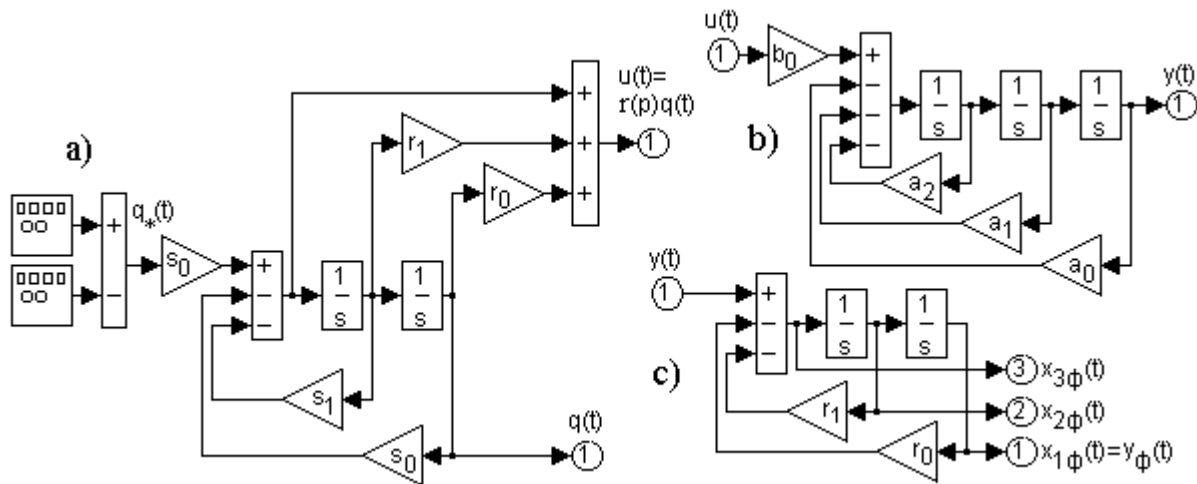


Рис. 1. S-диаграммы: ОИ – б), ГСИ – а), ФПС – с)

Если сигнал $u(t)$ задать так, как это показано на рис. 1а ($n = 3$), т.е. в виде

$$u(t) = r(p)q(t),$$

$$r(p) = p^{n-1} + r_{n-2}p^{n-2} + \dots + r_1p + r_0, \quad (3)$$

$$r_j = \text{const} > 0, \quad j = \overline{1, n-1},$$

а ФПС сформировать следующим образом

$$r(p)y_{\phi}(t) = y(t), \quad (4)$$

где $q(t) \in R$ – сигнал идентификации; $y_{\phi}(t) \in R$ – выход ФПС; $r(p)$ – произвольный гурвицев полином, то совокупность выражений (1), (3) и (4) позволяет записать уравнение для ЭОИ в виде

$$a(p)y_{\phi}(t) = b_0q(t). \quad (5)$$

Уравнения (1) и (5) являются эквивалентными друг другу, поскольку при $u(t) = q(t)$ уравнение (1) получает вид

$$a(p)y(t) = b_0q(t), \quad (6)$$

практически совпадающий с математическим описанием (5), хотя, конечно, выходной сигнал ЭОИ служит лишь оценкой выходного сигнала ОИ, но эта оценка достаточно точная. Такой вывод подтверждают и результаты имитационного моделирования. На рис. 2 приведен один из них, показывающий величину и характер изменения рассогласования – $\delta(t)$ между выходами ОИ и ЭОИ, динамика которых описывается соответственно – уравнениями (6) и (1), (3), (4). Вычислительный эксперимент проводился при нулевых начальных условиях и следующих значениях параметров: $a_0 = 6$, $a_1 = 8$, $a_2 = 4$, $b_0 = 1.9$, $s_0 = 100$, $s_1 = 20$, $r_0 = 1$, $r_1 = 1$, при этом входной сигнал линейного динамического блока ГСИ (см. рис. 1.а) был задан в виде

$$q_*(t) = 4(\sin t - 2\sin 3t). \quad (7)$$

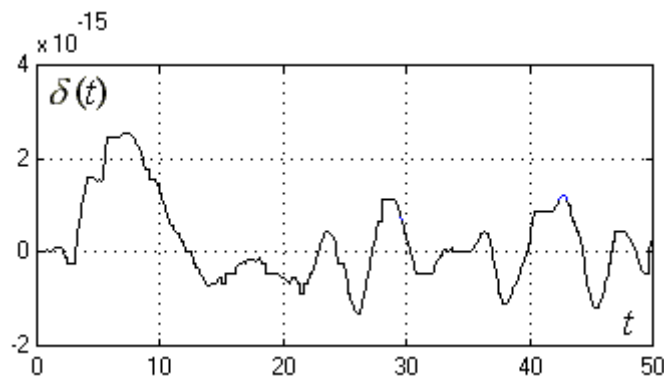


Рис. 2. График зависимости $\delta(t) = y(t) - y_{\phi}(t)$

Таким образом, далее будем полагать, что ОИ (1) в эквивалентном виде можно описать уравнениями (1), (3), (4) или (5), причем в любом из этих случаев описания ЭОИ измерению доступны все элементы его вектора состояний, который в дальнейшем будем обозначать как $x_{\phi}^T(t) = [x_{1\phi}(t), x_{2\phi}(t), \dots, x_{n\phi}(t)]$, (см. рис. 1с).

Постановка задачи

Пусть математическое описание ЭОИ представлено в пространстве состояний уравнением состояний и уравнением обобщенного выхода

$$\frac{dx_{\phi}(t)}{dt} = Ax_{\phi}(t) + Bq(t), \quad z_{\phi}(t) = g^T x_{\phi}(t), \quad (8)$$

где $x_\phi(t) \in R^n$ – вектор состояний ЭОИ; $z_\phi(t) \in R$ – обобщенный выход ЭОИ, формируемый с помощью некоторого n -мерного вектора g ; A – гурвицева матрица состояний, записанная в форме Фробениуса; $B^T = [0, \dots, 0, b_0]$ – вектор управления. Учитывая структуры матрицы A и вектора B , их всегда можно представить в виде:

$$A = A_{H\Pi} + B_* C_0^T, \quad B = B_* K_0, \quad (9)$$

где $B_*^T = [0, \dots, 0, 1]$; $A_{H\Pi}$ – нильпотентная матрица; C_0, K_0 – некоторые векторная и скалярная величины, с помощью которых в объекте (8) описывается уровень априорной неопределенности вида

$$C_{0i} = C_{0i}(\xi), \quad i = \overline{1, n}, \quad K_0 = K_0(\xi), \quad \xi \in \Xi. \quad (10)$$

Настраиваемая модель описывается уравнениями

$$\frac{dx_H(t)}{dt} = N(x_H(t) - x_\phi(t)) + A_H(t)x_\phi(t) + B_H(t)q(t), \quad (11)$$

$$z_H(t) = g^T x_H(t),$$

где N – гурвицева матрица, а матрица $A_H(t)$ и вектор $B_H(t)$ имеют структуры, подобные (9) и заданные в виде:

$$A_H(t) = A_{H\Pi} + B_* C^T(t), \quad (12)$$

$$B_H(t) = B_* K(t).$$

Требуется в условиях априорной неопределенности (10) определить значение элементов матрицы A и вектора B таким образом, чтобы имело место выполнение следующих предельных условий:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_H(t)) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (x_\phi(t) - x_H(t)) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} A_H(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (A_{H\Pi} + B_* C^T(t)) = A_{H\Pi} + B_* C_0^T = A, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} B_H(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (B_* K(t)) = B_* K_0 = B. \end{aligned} \quad (13)$$

Синтез алгоритмов контура адаптации

Синтез системы адаптации опирается на использование критерия гиперустойчивости [1, 2].

Во-первых, полагая $e(t) = x_\phi(t) - x_H(t)$, получим эквивалентное математическое описание системы (8), (9), (11), (12) в виде

$$\frac{de(t)}{dt} = Ne(t) + B_* \mu(t), \quad v(t) = g^T e(t), \quad (14)$$

$$\mu(t) = -(C(t) - C_0)^T x_\phi(t) - (K(t) - K_0) \cdot q(t).$$

Во-вторых, для нелинейной части системы (14) запишем интеграл

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(s) \cdot v(s) ds =$$

$$= \int_0^t [(C(s) - C_0)^T x_{\phi}(s)] v(s) ds + \int_0^t (K(s) - K_0) q(s) v(s) ds. \quad (15)$$

Если теперь алгоритмы самонастройки настройки вектора $C(t)$ и скалярной величины $K(t)$ синтезировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= \beta x_{\phi}(t) v(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= \alpha q(t) v(t), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\beta = \text{diag}\{\beta_i\}, \quad \beta_i = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad \alpha = \text{const} > 0,$$

то для интеграла (15) будет справедлива оценка

$$\begin{aligned} \eta(0, t) &\geq -\frac{1}{2} (C(0) - C_0)^T \alpha^{-1} (C(0) - C_0) - \frac{1}{2} \beta^{-1} (K(0) - K_0)^2 = \\ &= -\gamma_0^2 = \text{const} < 0, \quad \forall t > 0, \end{aligned}$$

что эквивалентно выполнению так называемого интегрального неравенства В.М. Попова [1, 2].

В-третьих, запишем передаточную линейной части системы (14)

$$W(s) = g^T (sE - N)^{-1} B_*,$$

для которой всегда имеет место частотное неравенство

$$\text{Re} W(j\omega) > 0, \quad \forall \omega \geq 0, \quad (17)$$

поскольку матрица N и вектор g задаются или выбираются проектировщиком. В частности, для выполнения требования (17) достаточно вектор g выбрать так [1], чтобы корни полинома $g^T (sE - N)^+ B_*$ чередовались с корнями полинома $\det(sE - N)$.

В-четвертых, в силу выполнения в условиях априорной неопределенности (10) неравенств (15) и (17) систему (14), (16) следует считать асимптотически гиперустойчивой, что приводит к выполнению первого из предельных условий (13). При этом, учитывая (16), имеют место соотношения

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dA_H(t)}{dt} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dB_H(t)}{dt} &= 0, \end{aligned}$$

из существования которых вытекает выполнение второго и третьего пределов из условий (13), а значит и адаптивность системы исследуемой системы (14), (16) в заданном классе Ξ .

Пример

Для иллюстрации качества функционирования системы адаптивной параметрической идентификации (1), (3), (4), (11), (12), (16), проводилось имитационное моделирование системы, состоящей из следующих элемен-

ТОВ:

ГСИ и ФПС (см. рис. 1а, 1с), где $s_0 = 100, s_1 = 20, r_0 = 1, r_1 = 1$;

ОИ (см. рис. 1б), функционирующего в условиях априорной параметрической неопределенности, уровень которой был задан в виде

$$3 < a_0 < 6, 4 < a_1 < 8, 2 < a_2 < 4, 0.6 < b_0 < 1.9; \quad (18)$$

настраиваемой модели (см. рис. 3), где $n_0 = 6, n_1 = 11, n_2 = 6, g_0 = 3.75, g_1 = 4, g_2 = 1$;

контура адаптации (см. рис. 4), где $\beta_0 = 5, \beta_1 = 10, \beta_2 = 5, \alpha_0 = 1.2$.

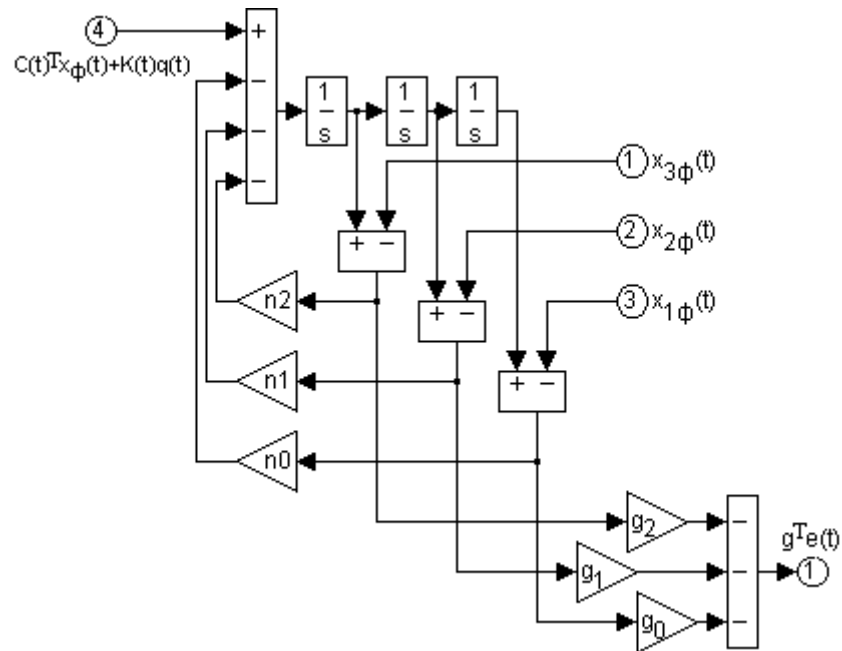


Рис. 3. S-диаграмма настраиваемой модели (11)

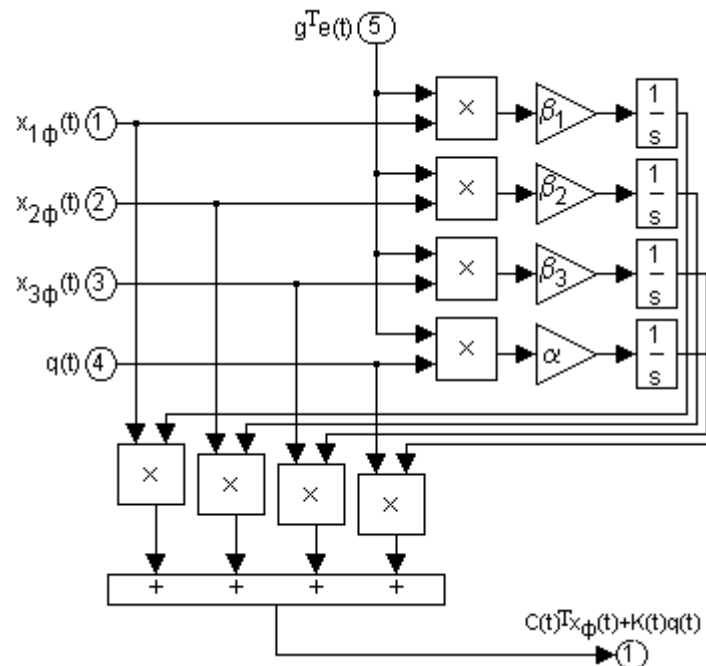


Рис. 4. S-диаграмма контура адаптации (16)

Общая структурная схема системы идентификации (1), (3), (4), (11), (12), (16) показана на рис. 5.

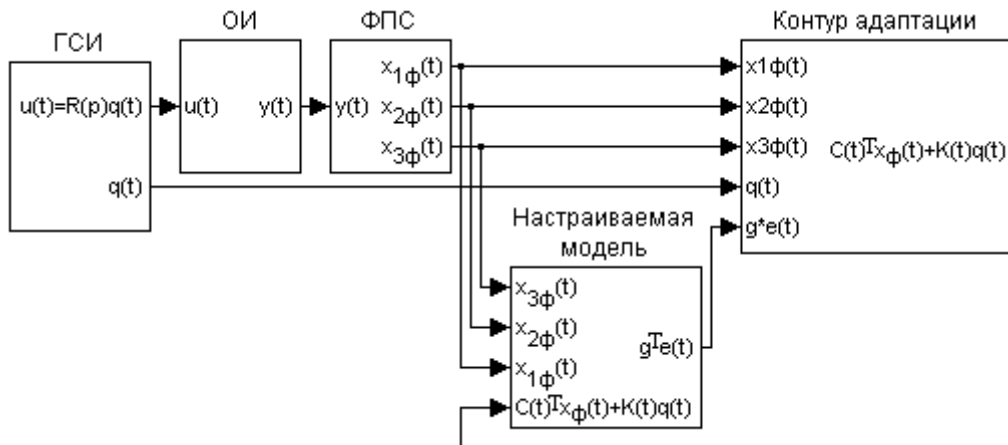


Рис.5. S-диаграмма системы идентификации (1), (3), (4), (11), (12), (16)

На рис. 6 представлены временные характеристики системы (1), (3), (4), (11), (12), (16) при параметрической идентификации математической модели ОИ для различных наборов значений ее параметров – a_0 , a_1 , a_2 и b_0 .

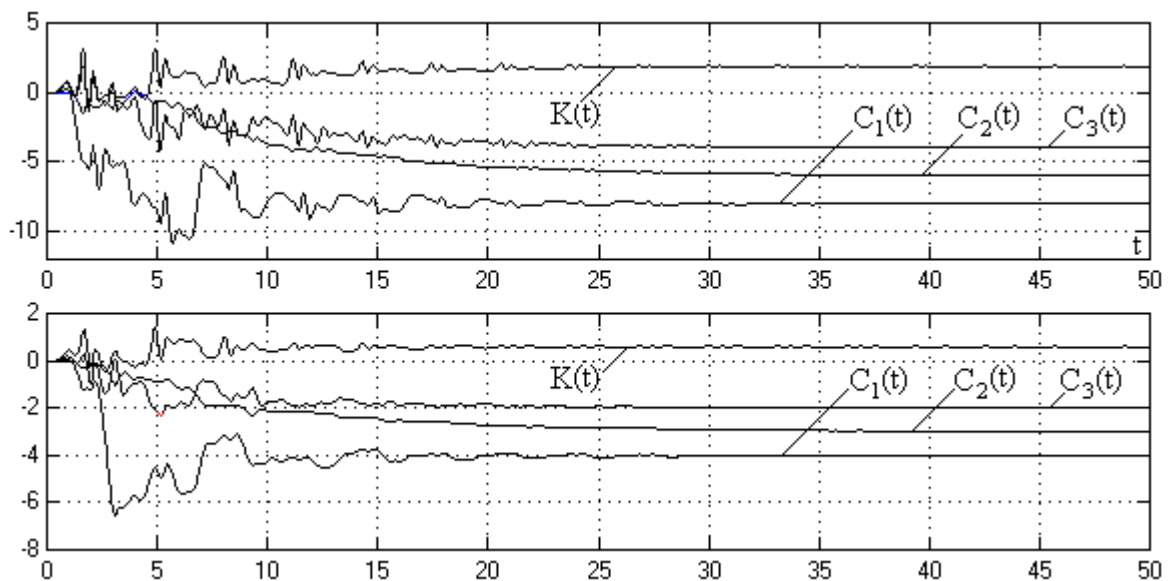


Рис. 6. Динамика процессов настройки в системе (1), (3), (4), (11), (12), (16)
 а) при $a_0=6, a_1=8, a_2=4, b_0=1,9$; б) при $a_0=3, a_1=4, a_2=2, b_0=0,6$

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод не только о возможности использования предложенного способа построения системы адаптивной идентификации, но и достаточно высокой точности идентификации параметров линейных динамических объектов, у которых относительный порядок передаточной функции превышает единицу. Кроме того, при существенном изменении параметров ОИ качество процесса самонастройки параметров остается достаточно хорошим.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.
2. *Landau I.D.* Adaptive control systems: the model reference approach. N.Y.: Marsel Dekker, 1979.

УДК 62-50

© 2001 г. **Н.П. Семичевская**

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СИНХРОНИЗАЦИИ СИСТЕМ

Рассматривается задача синхронизации двух нелинейных систем в условиях неполноты измерений и при неполной информации о параметрах системы. В рамках теории гиперустойчивости строится алгоритм адаптивного управления синхронизацией двух динамических систем и приводятся результаты моделирования синхронизации цепей Чуа.

Введение

В 1982 г. специалисты по электронным цепям Л. Чуа и Т. Мацумото предложили простую электронную цепь с одним нелинейным элементом, способную генерировать весьма разнообразные, в том числе хаотические, колебания. В задачах синхронизации часто основным требованием является совпадение или согласованность колебаний всех подсистем, при этом характеристики движения каждой подсистемы могут изменяться в широких пределах. Практический интерес представляет задача синхронизации двух или более систем, в которой не только начальное состояние (передатчика), но и ряд его параметров неизвестны при построении приемника. Эта задача может соответствовать применению параметрической модуляции для передачи сообщений и относится к задачам адаптивной синхронизации [1].

Постановка задачи и схема решения

Задача синхронизации совпадает с традиционной для теории управления задачей управления с эталонной моделью. Адаптивная система синхронизации передатчик-приемник описывается уравнениями вида системы Чуа