



УДК 684.511

© *Е. Л. Еремин, М. С. Капитонова, Е. А. Шеленок, 2012*

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С НЕЛИНЕЙНО-НЕСТАЦИОНАРНЫМ ЗАПАЗДЫВАЮЩИМ СОСТОЯНИЕМ В ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ**

*Еремин Е. Л.* - д-р техн. наук, профессор, e-mail: [ereminel@mail.ru](mailto:ereminel@mail.ru) (АмГУ);  
*Капитонова М. С.* - старший преп. кафедры информатики и методики преподавания информатики, e-mail: [karitonova\\_m@mail.ru](mailto:karitonova_m@mail.ru) (БГПУ); *Шеленок Е. А.* – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: [cidshell@mail.ru](mailto:cidshell@mail.ru) (ТОГУ)

Рассматривается задача имитационного моделирования адаптивной системы управления априорно неопределенным динамическим объектом с нелинейно-нестационарным запаздывающим состоянием, функционирующим в циклических режимах. С помощью вычислительного эксперимента выбираются значения числовых параметров контура управления, обеспечивающие хорошее качество функционирования системы при использовании предлагаемого алгоритма адаптации.

The simulation problem of adaptive control system for priori uncertain dynamic object with nonlinear-nonstationary delayed state operating in cyclic mode is considered. With computer simulation values of the numerical parameters of the control loop are chosen using the proposed adaptation algorithm.

*Ключевые слова:* динамический объект, адаптивное управление, априорная неопределенность, периодический алгоритм, имитационное моделирование, Simulink

### **Введение**

При разработке современных автоматических систем все чаще решаются задачи управления техническими объектами, для которых характерен периодический характер задающих и возмущающих воздействий, а также внутренних параметров системы. Например, управление приводами промышленных роботов [1- 3], металлообрабатывающих станков, производящих серию одинаковых деталей [4, 5] и т.п. Основная задача управления в таких периодических системах обычно сводится к минимизации ошибки управления.

Для решения подобной задачи, в работе [6] предлагалось использовать «модифицированную следящую систему с памятью» или так называемую систему управления циклического действия. В работе [7] рассматривается решение аналогичной задачи построения периодических систем управления, где при наличии периодических возмущений осуществлен синтез систем на основе принципа внутренней модели, т.е. за счет введения в основной контур управления генератора периодических сигналов. Данный метод стабилизации возмущений получил развитие в работе [5], в которой описаны результаты разработки и внедрения самообучающихся электроприводов подачи токарных станков для финишной обработки деталей.

Зачастую управление происходит в условиях существенной нестационарности и нелинейности динамических характеристик объекта управления, В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного или робастного управления, позволяющие сохранить работоспособность систем при наличии априорной неопределенности, нелинейности и нестационарности в объекте управления. В частности, в работе [8] приводится решение задачи синтеза адаптивной системы для нелинейных  $T$ -периодических скалярных объектов, а в работе [9] решена задача комбинированного робастно-периодического закона управления для нелинейно-нестационарного объекта при наличии как периодических, так и непериодических возмущений.

Кроме этого объект может обладать временным запаздыванием, которое необходимо учитывать при разработке систем управления. В математическом описании объекта управления запаздывание встречается довольно часто [10- 12].

Одной из важных проблем в области разработки и проектирования сложных технических систем является исследование динамики их функционирования и анализ показателей их эффективности. Одним из известных методов решения данной проблемы является имитационное моделирование, основанное на реализации математических моделей систем в виде моделирующего алгоритма на ЭВМ для исследования их динамических характеристик. При этом затраты рабочего времени и материальные затраты оказываются незначительными по сравнению с затратами на натурный эксперимент.

В данной работе для априорно неопределенных объектов управления с нелинейно-нестационарным запаздывающим состоянием, функционирующих в периодическом режиме, рассмотрена задача имитационного моделирования, в ходе решения которой происходит подбор числовых значений постоянных коэффициентов контура управления, которые обеспечивают хорошее качество функционирования системы при использовании предлагаемого алгоритма адаптации.

Отличительной особенностью закона управления разработанной системы управления является использование генератора периодических сигналов в контуре самонастройки адаптивного регулятора [8, 13-15]. Структура контура самонастройки выбирается подобно структуре регулятора, рассмотренного в работах [6, 7], а синтез системы управления опирается на критерий гиперустойчивости [16].



### Математическое описание

Рассматривается задача управления нестационарным объектом, динамика которого описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + D(t, x(t-\tau))x(t-\tau) + Bu(t) + f(t), \quad (1)$$

$$y(t) = x(t), v(t) = g^T y(t),$$

где  $x(t) \in R^n$  – вектор состояний объекта регулирования;  $\tau$  – время запаздывания;  $y(t) \in R^m$  – вектор выхода объекта регулирования;  $v(t)$  – обобщенный выход, формируемый за счет специального выбора вектора  $g^T = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ ;  $D(t, x(t-\tau)) = D(t+T, x(t-\tau))$  – нелинейная нестационарная матрица вида

$$D(t, x(t-\tau)) = B_* d^T(t, x(t-\tau)),$$

$$d^T(t, x(t-\tau)) = (d_1(t, x_1(t-\tau), \dots, x_n(t-\tau)), \dots, d_n(t, x_1(t-\tau), \dots, x_n(t-\tau))) \quad (2)$$

$$|d_i(t, x(t-\tau))| \leq d_{0i}^2 = \text{const}, i = \overline{1, n},$$

вектор  $B_*^T = (0, \dots, 0, 1)$ ;  $f(t) = f(t+T)$  – вектор возмущений с элементами, являющимися периодическими функциями времени с постоянным периодом  $T$ , который может удовлетворять неравенству

$$\|f(t)\| \leq f_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Вектор возмущений  $f(t)$  можно представить в виде  $f(t) = B_* f_1(t)$ , где  $f_1(t) = f_1(t+T)$  – скалярная  $T$ -периодическая функция.

Объект управления функционирует в условиях априорной неопределенности

$$A = A(\xi), B = B(\xi), \xi \in \Xi, \quad (4)$$

где  $\Xi$  – известное множество возможных значений вектора  $\xi$ .

Желаемое поведение объекта управления задается с помощью неявной эталонной модели, которая описывается уравнениями:

$$\frac{dx_*(t)}{dt} = A_* x(t) + B_* v_*(t), A_* = A + \chi_0 B g^T$$

$$y_*(t) = x_*(t), \quad (5)$$

$$v_*(t) = g^T y_*(t) = r(t+T)$$

$$v_*(t) = v_*(t+T).$$

Управляющее воздействие  $u(t)$  формируется следующим законом:

$$u(t) = k(t)v(t) - \chi_1 v(t) + \chi_2^T y(t-\tau), \quad (6)$$

где  $k(t), \chi_1(t) \in R$  и  $\chi_2(t) \in R^n$  – соответственно, скалярные и векторный коэффициенты контура настройки адаптивного регулятора;

$v(t)$  - выход дополнительного контура адаптивного регулятора вида

$$\begin{aligned} v(t) &= v(t-T) + z(t), \\ z(t) &= v_*(t) - v(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$T = \text{const} > 0, v(s) = 0, s \in [-T, 0]$$

Можно показать [7, 8], что алгоритмы настройки регулятора могут быть синтезированы в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dk(t)}{dt} &= \begin{cases} \alpha v(t)(v_*(t) - v(t)), \forall |v_*(t) - v(t)| < \phi, \\ 0, \forall |v_*(t) - v(t)| > \phi \end{cases} \\ \frac{d\chi_1(t)}{dt} &= \begin{cases} \beta v(t)(v_*(t) - v(t)), \forall |v_*(t) - v(t)| < \phi, \\ 0, \forall |v_*(t) - v(t)| > \phi \end{cases} \\ \chi_{2i}(t) &= \chi_{2i}(t-T) + \gamma_i x_i(t-\tau)(v_*(t) - v(t)), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma_i = \text{const} > 0$ ,  $\chi_{2i}(s) = 0$ ,  $s \in [-T, 0]$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Требуется для системы управления (1) – (8) с помощью имитационного моделирования выбрать числовые значения постоянных коэффициентов адаптивного регулятора, чтобы обеспечивалось слежение за командным сигналом  $r(t+T)$  при выполнении целевых условий:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |x_*(t) - x(t)| &\leq \varepsilon_0^2, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} k(t) &= k_0 = \text{const}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \chi_1(t) &= \chi_0 = \text{const}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \chi_2(t) &= \chi_{02}(t+T). \end{aligned} \quad (9)$$

### Simulink-модель и результаты вычислительного эксперимента

В ходе решения задачи имитационного моделирования были разработаны схемы моделирования в среде Simulink. На рисунках ниже представлены структурная схема адаптивной системы управления, S-модели объекта управления, контура настройки адаптивного регулятора и блока настройки.

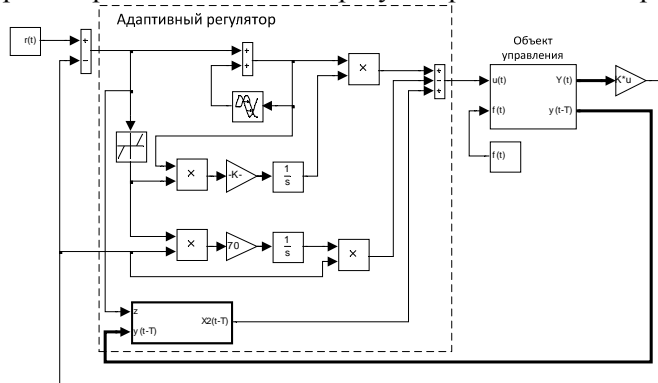


Рис. 1. Simulink-модель адаптивной системы управления (1) – (8)

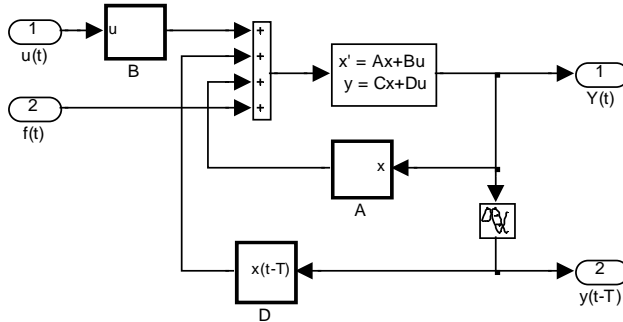


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

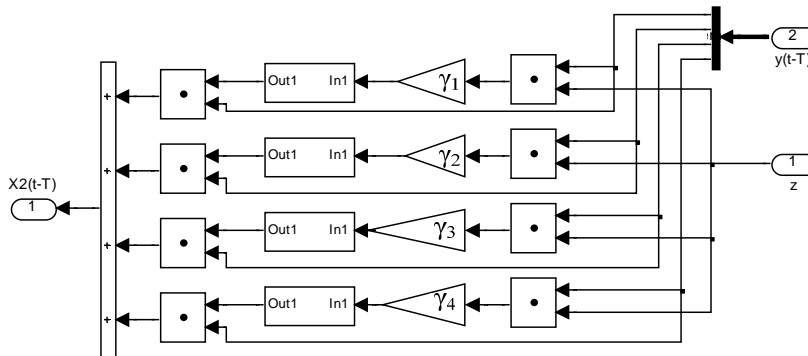


Рис. 3. S-схема контура настройки параметра  $\chi_2(t)$  адаптивного регулятора

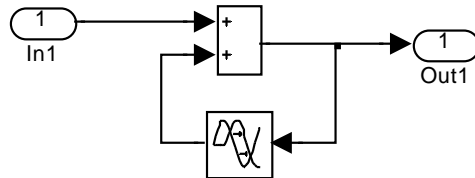


Рис. 4. Структура периодической настройки

Объект управления имеет следующую структуру матриц:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K \end{pmatrix}; f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_4(t) \end{pmatrix};$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_1(t, x(t-\tau)) & d_2(t, x(t-\tau)) & d_3(t, x(t-\tau)) & d_4(t, x(t-\tau)) \end{pmatrix}.$$

Уровень априорной параметрической неопределенности объекта задан следующим образом:

$$18,6 \leq K \leq 19,5;$$

$$18,4 \leq a_1 \leq 23,5; 41,4 \leq a_2 \leq 64; 45,7 \leq a_3 \leq 50; 8,5 \leq a_4 \leq 16,5.$$

Для наглядности полученных результатов рассмотрим задачу управления системой и сформируем следующие матрицы, векторы и скалярные функции

$$A_m = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 20 & 45 & 49 & 10 \end{pmatrix}; B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 19 \end{pmatrix}; f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_4(t) \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_1(t, x(t-\tau)) & d_2(t, x(t-\tau)) & d_3(t, x(t-\tau)) & d_4(t, x(t-\tau)) \end{pmatrix};$$

$$d_1(t, x(t-\tau)) = -2 + 6 \cdot \cos(0.8 \cdot x_1(t-\tau)),$$

$$d_2(t, x(t-\tau)) = -4 + 8 \cdot \sin(10 \cdot x_1(t-\tau) \cdot x_3(t-\tau)),$$

$$d_3(t, x(t-\tau)) = 0.5 + 3.5 \cdot \sin(7 \cdot x_1(t-\tau) \cdot e^{-8 \cdot x_2(t-\tau)}),$$

$$d_4(t, x(t-\tau)) = 1.2 - 8 \cdot \cos(30 \cdot x_1(t-\tau) \cdot x_2(t-\tau) \cdot e^{-x_3(t-\tau)}).$$

Задающее воздействие  $r(t)$  и возмущение  $f(t)$  заданы в виде функций:

$$r(t) = 0.897 - 0.1 \cdot e^{-t} + 1.4 \cdot (1.3 \cdot \cos(0.04\pi t))^3;$$

$$f(t) = 2.5 \cdot \sin^2(0.04\pi t).$$

Параметры адаптивного регулятора выбраны следующим образом:

$$\alpha = 700000; \beta = 70; \gamma_1 = 4; \gamma_2 = 80; \gamma_3 = 2000; \gamma_4 = 500; T = 25; \phi = 0.001.$$

Результаты моделирования динамических процессов в системе (1) – (8) показаны на рисунках 5 – 12.

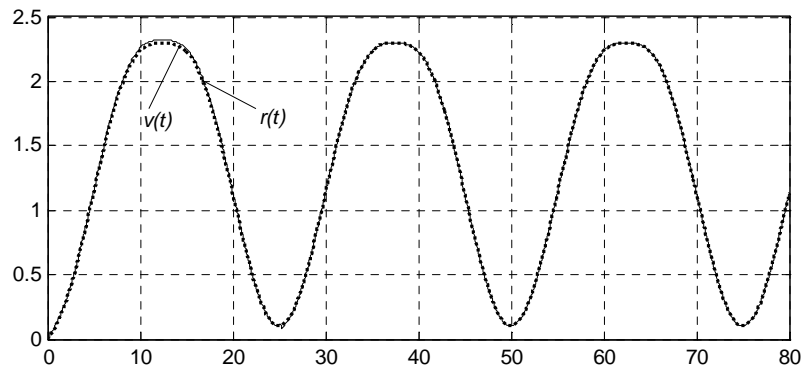


Рис. 5. Сигналы выхода эталонной модели и объекта управления

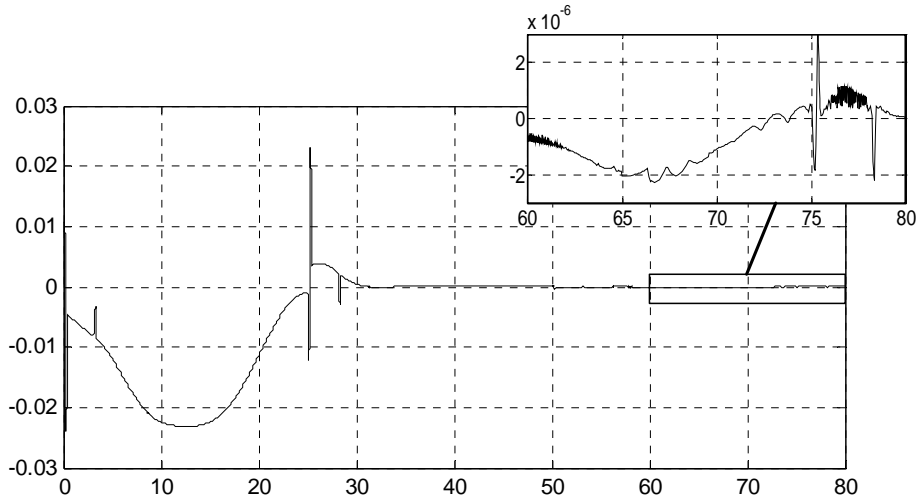


Рис. 6. Ошибка регулирования  $z(t)$

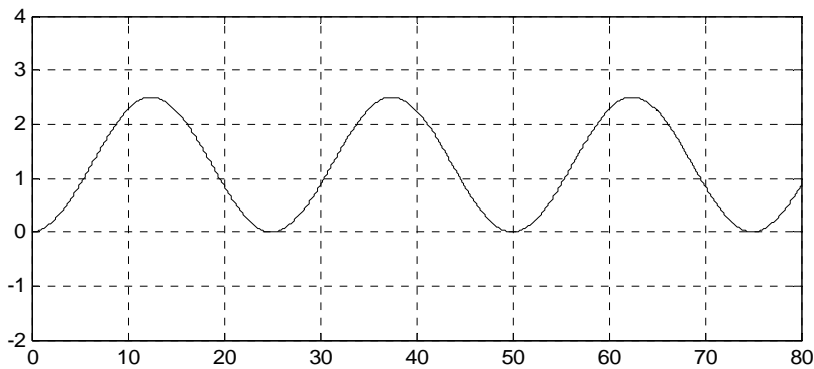


Рис. 7. Действующее внешнее возмущение  $f(t)$

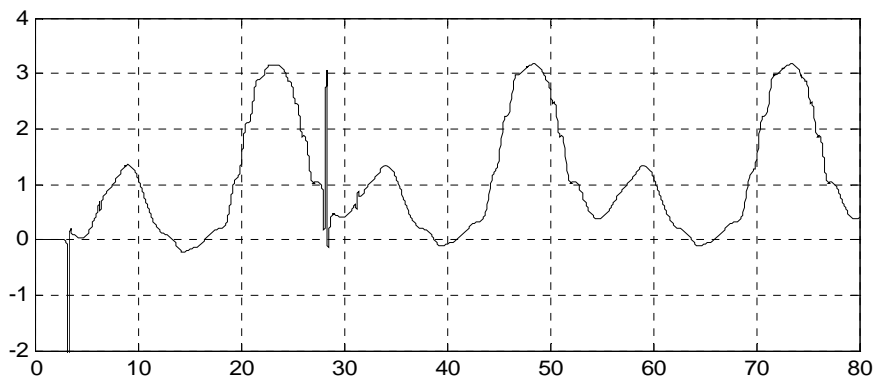


Рис. 8. Нелинейная нестационарность  $D(t, x(t - \tau))$  в объекте управления

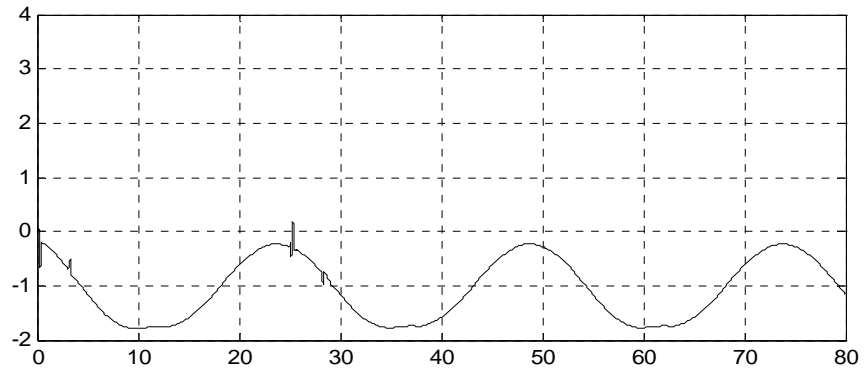


Рис. 9. Сигнал управления  $u(t)$

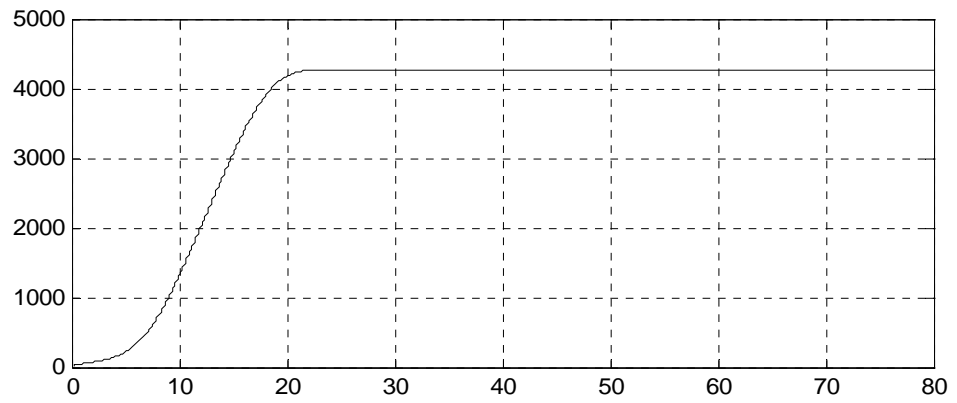


Рис. 10. Настройка параметра  $k(t)$  адаптивного регулятора

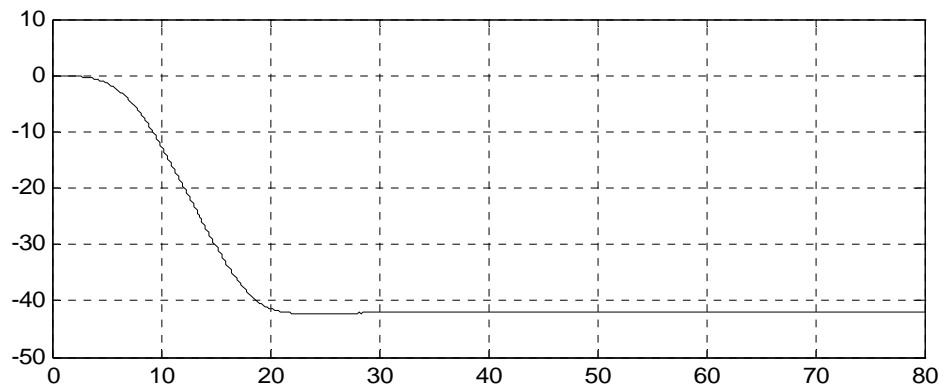


Рис. 11. Динамика настройки параметра  $\chi_1(t)$  адаптивного регулятора



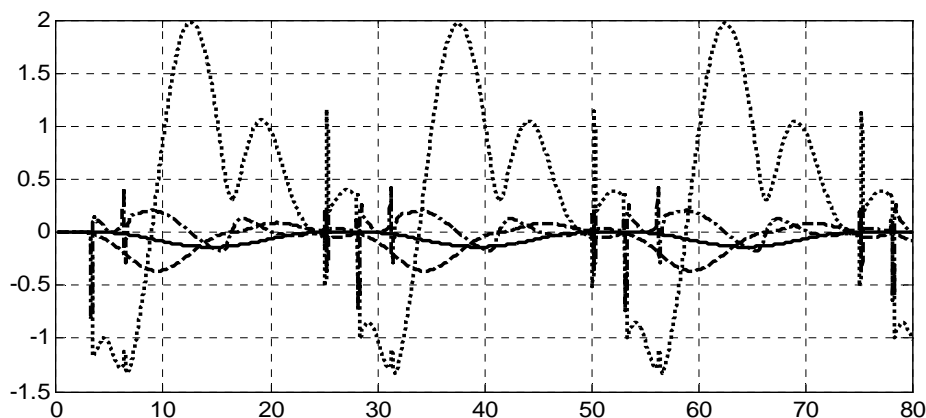


Рис. 12. Динамика настройки параметров  $\chi_2(t)$  адаптивного регулятора

Представленные результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод о хорошем качестве функционирования синтезированной системы управления динамическим объектом с запаздыванием по состоянию.

### Заключение

Представлено решение задачи имитационного моделирования адаптивной системы управления априорно неопределенным динамическим объектом, функционирующим в периодическом режиме. На основании проведенного вычислительного эксперимента, показано, что с помощью предложенного контура адаптивного управления обеспечивается хорошее качество функционирования построенной системы при различных параметрах управляемого объекта.

### Библиографические ссылки

1. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. New York: Wiley, 2000.
2. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. М.: Мир, 1989.
3. Юревич Е. И. Управление роботами и робототехническими системами. СПб. 2000, 171с.
4. Ерёмин Е. Л., Капитонова М. С., Чепак Л. В., Шеленок Е. А. Система адаптивно-периодического управления мехатронным модулем металлорежущих станков // Информатика и системы управления. – 2012. – №2. – С. 150 – 159.
5. Кацевич В. Л., Королев В. В., Никольский А. А. Применение самообучающихся электроприводов подачи токарных станков для повышенной точности формы серийных деталей // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 21 – 25.



6. *Закс В. С.* Об одной возможности повышения точности регулирования в следящих системах циклического действия // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 1. – С. 170 – 174.
7. *Shinji Hara, Yutaka Yamamoto, Tohru Omata, Micho Nakato.* Repetitive Control System: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals // IEEE Transactions on automatic control. – 1988. – Vol. 33, N 7. – P. 659 – 668.
8. *Ерёмин Е. Л., Капитонова М. С.* Адаптивная система управления  $T$ -периодическими нелинейными объектами // Проблемы управления. – 2007. – №1. – С. 2-7.
9. *Ерёмин Е. Л., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Комбинированные алгоритмы робастно-периодического управления нелинейным объектом с запаздыванием // Информатика и системы управления. – 2009. – №3. – С. 125-135.
10. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
11. *Клюев А. С., Лебедев А. Т., Семенов Н. П., Товарнов А. Г.* Наладка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. – М. Энергия, 1977.
12. *Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А.* Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. С. 448.
13. *Ерёмин Е. Л.* Нелинейные преобразования алгоритмов прямого адаптивного управления непрерывными объектами: Автореф. дис. ...д-ра техн. Наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1994.
14. *Ерёмин Е. Л.* Новый тип алгоритмов параметрической настройки адаптивных регуляторов для систем управления нестационарными  $T$ -периодическими объектами // Информатика и системы управления. – 2003. – № 2. – С. 100 – 110.
15. *Пат. 2265873 РФ.* Адаптивная система управления для динамических объектов с периодическими коэффициентами / Е.Л. Еремин, М.С. Капитонова, Л.В. Чепак // Бюл. – 2005. – № 34. – С. 380.
16. *Ерёмин Е. Л., Цыкунов А. М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992. – 182 с.