УДК 684.511

СИСТЕМА КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ[1]

Лелянов Б. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: bnl@ais.khstu.ru; *Смаль И. А.* – магистрант кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: shade_wood@mail.ru; *Шеленок Е. А.* – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: cidshell@mail.ru (ТОГУ)

Рассматривается решение задачи адаптивно-робастного управления нелинейным периодическим объектом, функционирующим при наличии априорной неопределенности и внешних возмущений. В качестве регулятора предлагается комбинированный контур, содержащий генератор периодических сигналов с настраиваемым коэффициентом.

The solution to the problem of an adaptive-robust control for nonlinear periodic object functioning in the presence of a priory uncertainty and external perturbations is considered. As a regulator the combined contour containing a generator of periodic signals with the adjusted coefficient is proposed.

Ключевые слова: периодический режим, комбинированный регулятор, априорная неопределенность, критерий гиперустойчивости, нелинейный объект.

Введение

На сегодняшний день задачи проектирования так называемых периодических систем управления (ПСУ) являются весьма актуальными и вызывают большой интерес исследователей в области теории автоматического управления. Разработано достаточно много принципов построения устойчивых систем управления, общим принципом которых является использование специального блока – генератора периодических сигналов (ГПС) позволяющего адаптироваться к периодическим задающим воздействиям и сформировать управляющий сигнал, компенсирующий действие внешних и параметрических возмущений циклического характера [1 – 17].

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. в рамках проекта «Автоматические системы управления периодическими режимами априорно неопределенных, нелинейно-нестационарных динамических объектов» (регистрационный номер: 14.B37.21.1481).

В зависимости от класса управляемых объектов предложены всевозможные комбинации периодических регуляторов. В частности, для управления линейными стационарными динамическими объектами разработан так называемый двухрелейный регулятор [2] и периодический робастный контур управления [3]. При наличии в объекте управления нестационарных параметров, обусловленных особенностями его функционирования в работах [4-9] с помощью критерия гиперустойчивости получены адаптивно-периодические алгоритмы. В [10-17] синтезированы комбинированные нелинейные контуры управления, содержащие ГПС и робастную часть, позволяющие обеспечить стабильное функционирование нелинейно-нестационарных объектов, работающих в условиях априорной параметрической неопределенности и действия внешних возмущений. Следует отметить, что для управления объектами указанного класса разработаны и другие регуляторы [18, 19].

Для большинства реальных технических объектов помимо неизвестных параметров и внешних возмущений присуще явление запаздывания, которое может негативно сказаться на их работе. Поэтому, при разработке управляющей системы всегда необходимо учитывать данное обстоятельство.

В настоящей работе, используя результаты [10, 11, 16, 17], рассматривается задача комбинированного адаптивно-робастного управления нелинейным динамическим объектом с запаздыванием. Решение, аналогично [17], базируется на использовании автоматической настройки коэффициента периодической части регулятора.

Исходное математическое описание

Пусть динамические свойства нелинейного параметрически неопределенного объекта описываются уравнениями

$$\begin{gathered}\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + c(y,t) + by^5(t-\tau) + bu(t) + f(t),\\ y(t) = L^T x(t),\ x(q) = \psi(q),\ q \in [-\tau;\ 0],\end{gathered} \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор переменных состояния; $y(t) \in R$ – выход объекта; A – стационарная матрица состояния, представимая в виде $A = A_0 + \chi_0 b_0 L^T$; A_0 – гурвицева матрица; $\chi_0 = const > 0$; $b_0^T = [0,\ \ldots\ ,\ 0,\ 1]$ – известный стационарный вектор; $c(y,t)$ – нелинейная ограниченная по величине вектор-функция

$$c(y,t) = b_0 c_n(y,t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \ldots \\ c_n(y,t) \end{pmatrix},\ |c_n(t,y)| < c_0 = const > 0; \tag{2}$$

$b = b_0$ – вектор управления; $f(t) \in R^n$ – вектор внешних возмущений следующей структуры

$$f(t) = b_0 f_n(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ ... \\ f_n(t) \end{pmatrix}, \ | f_n(t) | = | f_{пер}(t) + f_{непер}(t) | < f_0 = const > 0, \qquad (3)$$

L – некоторый вполне определенный вектор, формирующий выход объекта управления; $\tau = const > 0$ – известное запаздывание времени; $\psi(q)$ – ограниченная начальная функция, принадлежащая пространству ограниченных начальных функций C_q.

Условия априорной параметрической неопределенности рассматриваемого объекта представим соотношениями

$$\begin{gathered} A = A(\xi), \\ L = L(\xi), \\ c(y,t) = c_\xi(y,t), \\ f(t) = f_\xi(t), \end{gathered} \qquad (4)$$

где неизвестный вектор $\xi \in \Xi$ определяет уровень априорной неопределенности; Ξ – известное числовое множество.

Зададим структуру регулятора, аналогично [17], в виде робастно-периодической комбинации

$$\begin{gathered} u(t) = k(t)\theta(t) + u_{роб}(t), \\ \theta(t) = \theta(t-T) + z(t), \\ \theta(s) = 0, \ s \in [-T; 0], \end{gathered} \qquad (5)$$

где $k(t)$ – самонастраивающейся коэффициент регулятора; $\theta(t)$ – выходной сигнал генератора периодических сигналов; s – комплексная переменная; $u_{роб}(t)$ – робастная составляющая управляющего контура; $z(t)$ – сигнал ошибки рассогласования между объектом (1) – (3) и определяющим требуемое качество его переходных процессов неявным периодическим эталоном [10, 17]

$$\begin{gathered} \frac{dx_0(t)}{dt} = A_0 x_0(t) + b_0 \theta_0(t), \\ y_0(t) = L^T x_0(t), \\ A_0 = A - \chi_0 b_0 L^T, \end{gathered} \qquad (6)$$

где $x_0(t) \in R^n$ – эталонные переменные состояния; $\theta_0(t) = \theta_0(t+T)$ – некоторый неявный периодический сигнал; $y_0(t) \in R$ – выходной сигнал эталона, совпадающий с периодическим командным сигналом $r(t) = r(t+T)$.

Постановка задачи

Для объекта управления (1) – (3), функционирующего в условиях априорной параметрической неопределенности (4), требуется с использованием неявного периодического эталона (6) синтезировать явный вид алгоритма самонастройки $k(t)$ и робастной части $u_{роб}(t)$ комбинированного регулятора (5) таким образом, чтобы в замкнутой системе управления (1) – (3), (5), (6) при любых начальных условиях $x(0)$, любом уровне априорной неопределенности $\xi \in \Xi$, любых внешних возмущениях $f(t)$ были выполнены предельные целевые условия

$$\lim_{t\to\infty} | k(t) | \le k_0, \quad \lim_{t\to\infty} \theta(t) = \theta^*(t) = \theta(t+T), \quad \lim_{t\to\infty} | z(t) | = \lim_{t\to\infty} | r(t) - y(t) | \le z_0, \tag{7}$$

где $k_0 = const > 0$, $z_0 = const > 0$ – достаточно малые числа.

Алгоритмы регулятора системы управления

Для получения явного вида требуемых алгоритмов управления комбинированного регулятора (5), как и в [4 – 18], воспользуемся типовой схемой критерия гиперустойчивости.

Используя описание объекта управления (1) – (3), уравнения регулятора (5) и периодического эталона (6), а также пользуясь понятием ошибки рассогласования $\varepsilon(t) = x_0(t) - x(t)$, получим следующее эквивалентное математическое описание синтезируемой системы

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = A_0\varepsilon(t) + b_0\mu(t), \quad z(t) = L^T\varepsilon(t) = y_0(t) - y(t), \quad \mu(t) = -[k(t)\theta(t) - \tilde{\theta}(t)] - \chi_0 y(t) - f_{непер}(t) - u_{роб}(t), \tag{8}$$

где $\tilde{\theta}(t) = \tilde{\theta}(t+T) = \theta(t) + c_n(t, y) + y^5(t-\tau) + f_{непер}(t)$ — периодический сигнал.

Если коэффициенты вектора L выбрать таким образом, что полином

$$l(s) = l_n s^{n-1} + l_{n-1}s^{n-2} + \ldots + l_2 s + l_1,$$

$$l_i = \text{const} > 0 \ (i = 1, 2, \ldots, n)$$

будет гурвицевым, то с помощью критерия гиперустойчивости, аналогично работам [16, 17], можно показать, что синтез алгоритма самонатсройки параметра $k(t)$ и робастной составляющей регулятора в виде

$$\frac{dk(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha_0\theta(t)z(t), & \forall\, | z(t) | > \varphi, \\ 0, & \forall\, | z(t) | < \varphi, \end{cases} \tag{9}$$

$$u_{роб}(t) = [\alpha_1 | y(t) |^{\beta} + \alpha_2] z(t), \tag{10}$$

где $\alpha_0 = const > 0$, $\alpha_1 = const > 0$, $\alpha_2 = const > 0$, $\beta = const > 1$; $\varphi = const > 0$ – величина зоны нечувствиетльности; обеспечивает существование справедливого интегрального неравенства Попова

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(\varsigma)z(\varsigma)d\varsigma \geq -\gamma_0^2 = const,\ \forall t > 0, \tag{11}$$

и выполнение требований вещественности и строгой положительности, накладываемых на линейную стационарную часть эквивалентной системы (8)

$$\operatorname{Re}\left[W_{ЛСЧ}(j\omega)\right] > 0,\quad \forall\,\omega \in (-\infty;\infty). \tag{12}$$

А, поскольку для видоизмененной системы (8) выполнены требования (11), (12), то исходная система (1) – (3), (5), (6), (9), (10) будет являться гиперустойчивой в заданном классе априорной неопределенности $\xi \in \Xi$ и для нее с течением времени будут выполнены предельные целевые условия (7).

Пример работы системы

Для иллюстрации работы синтезированной системы (1) – (3), (5), (6), (9), (10) рассмотрим ее динамические характеристики при следующих матрицах и векторах объекта управления (1) – (3)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{pmatrix},\ b = b_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},\ c(y,t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_4(y,t) \end{pmatrix},$$

$$f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_4(t) \end{pmatrix},\ L = \begin{pmatrix} l_4 \\ l_3 \\ l_2 \\ l_1 \end{pmatrix},$$

$$c_4(y,t) = y^r(t)dy^v(t),$$

$$f_4(t) = f_{4пер}(t) + f_{4пнеер}(t),$$

$$f_{4пер}(t) = |1{,}2\sin 0{,}4\pi t|^{\lambda},$$

$$f_{4непер}(t) = |\sin 0{,}4\pi t|^{\lambda}\ \upsilon \cdot \sin 2t \cdot \cos 2t.$$

Уровень априорной неопределенности параметров представленных параметров объекта имеет вид

$$\begin{gathered} a_1^- = -20 \leq a_1 \leq 20 = a_1^+;\ a_2^- = 2 \leq a_2 \leq 20 = a_2^+; \\ a_3^- = -30 \leq a_3 \leq 9 = a_3^+;\ a_4^- = -15 \leq a_4 \leq 5 = a_4^+; \\ l_1^- = 1 \leq l_1 \leq 5 = l_1^+;\ l_2^- = 2 \leq l_2 \leq 7 = l_2^+; \\ l_3^- = 2 \leq l_3 \leq 15 = l_3^+;\ l_4^- = 0.5 \leq l_4 \leq 2.5 = l_4^+; \\ r^- = 2 \leq r \leq 7 = r^+;\ v^- = 3 \leq v \leq 5 = v^+; \\ d^- = -2 \leq d \leq 5 = d^+;\ \lambda^- = 1 \leq \lambda \leq 6 = \lambda^+; \end{gathered} \tag{12}$$

$$\upsilon^- = 0{,}1 \le \upsilon \le 2{,}5 = \upsilon^+.$$

Определим задающее воздействие рассматриваемой следящей системы с помощью периодической функции

$$r(t) = r(t+T) = \sin \pi t \cdot [1{,}1 - 0{,}1\cos 6\pi t], \tag{13}$$

графическая интерпретация которой представлена на рис. 1.

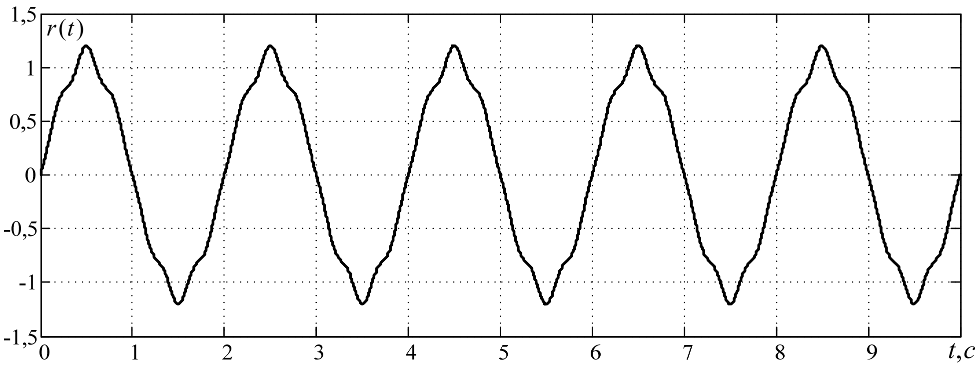

Рис. 1. Командный сигнал системы управления (13)

После нескольких этапов имитационного моделирования постоянные коэффициенты комбинированного регулятора были выбраны со значениями

$$\begin{gathered} \alpha_0 = 500000;\ \alpha_1 = 12;\ \alpha_2 = 2; \\ \beta = 1{,}5;\ \varphi = 0{,}001;\ T = 2; \end{gathered} \tag{14}$$

На рис. 2 – 4 представлены динамические характеристики системы при исходных данных

$$\begin{gathered} a_1 = -15;\ a_2 = 2;\ a_3 = 5;\ a_4 = -4; \\ l_1 = 1;\ l_2 = 4;\ l_3 = 2;\ l_4 = 1; \\ r = 3;\ v = 5;\ d = 0{,}2; \\ \lambda = 3;\ \upsilon = 0{,}5;\ \tau = 3. \end{gathered} \tag{15}$$

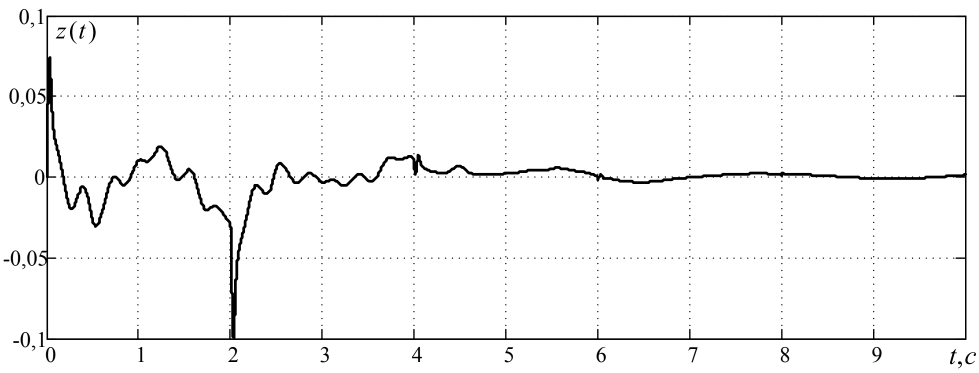

Рис. 2. Ошибка регулирования при параметрах (15)

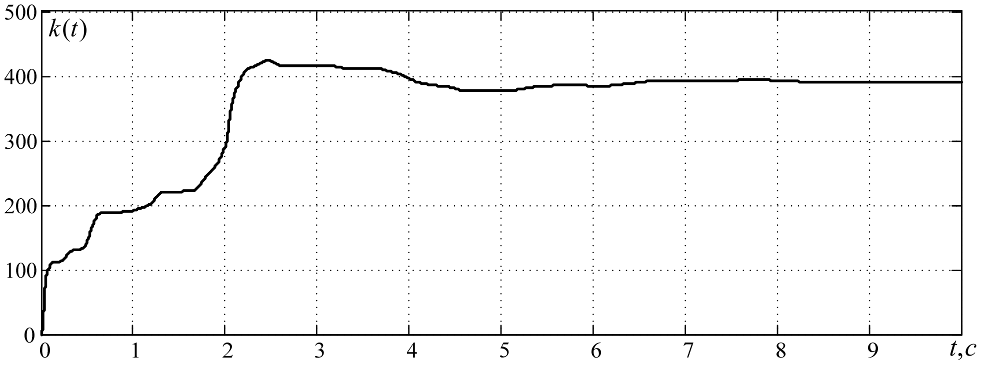

Рис. 3. Настройка коэффициента $k(t)$ при параметрах (15)

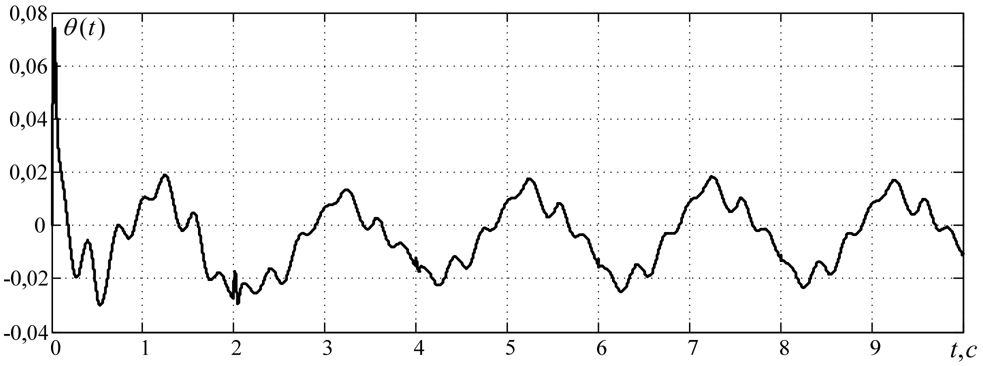

Рис. 4. Выход генератора периодических сигналов при параметрах (15)

Рисунки 5 – 7 иллюстрируют динамику системы управления со следующими параметрами

$$
\begin{gathered}
a_1 = -15;\ a_2 = 20;\ a_3 = -30;\ a_4 = -8; \\
l_1 = 2;\ l_2 = 4;\ l_3 = 5;\ l_4 = 1; \\
r = 5;\ v = 3;\ d = 0{,}2; \\
\lambda = 3;\ \upsilon = 0{,}5;\ \tau = 3.
\end{gathered} \tag{16}
$$

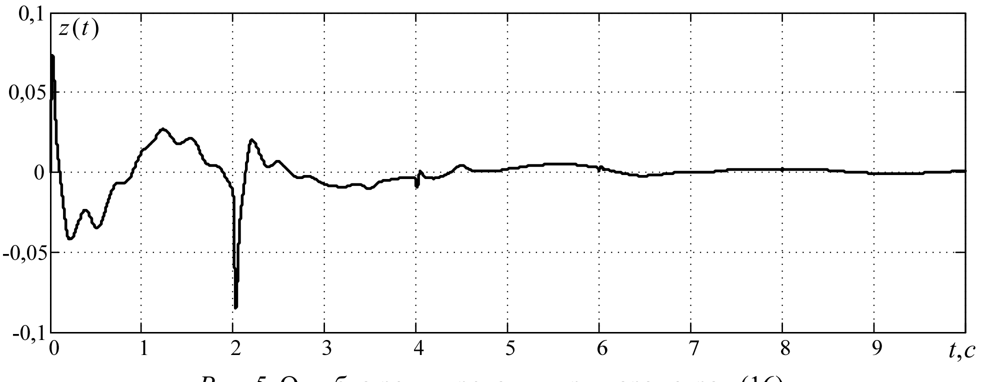

Рис. 5. Ошибка регулирования при параметрах (16)

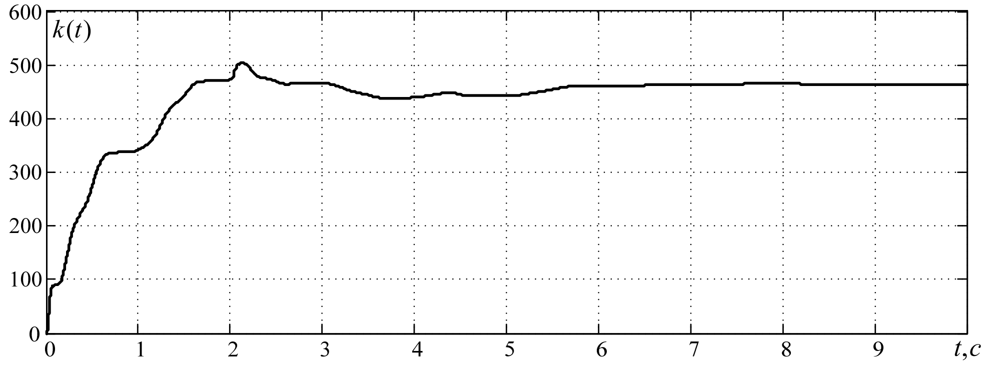

Рис. 6. Настройка коэффициента $k(t)$ при параметрах (16)

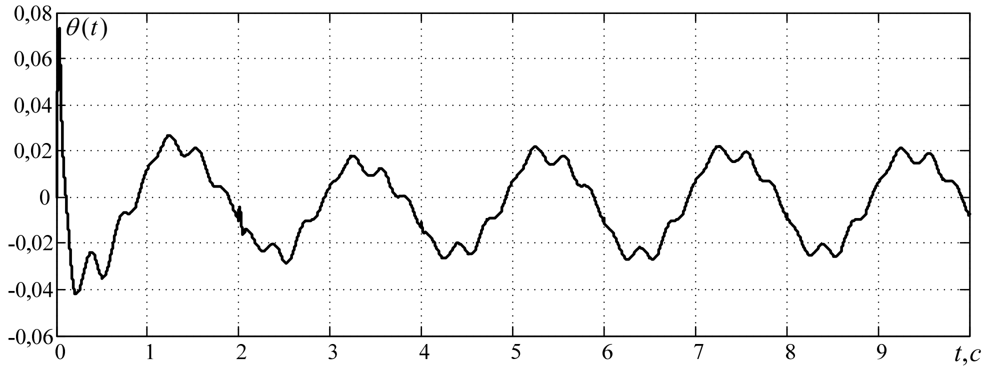

Рис. 7. Выход генератора периодических сигналов при параметрах (16)

Из представленных рисунков видно, что применение предложенного комбинированного контура (5), (9), (10) в системе циклического управления нелинейным объектом с запаздыванием (1) – (3) при его различных параметрах позволяет обеспечить формирование требуемого периодического режима на выходе объекта с достаточно высоким качеством. В частности через 6 секунд работы величина ошибки регулирования оказывается пренебрежительно малой (рис. 3 и 5), что свидетельствует о точном слежении за командным сигналом (13). Кроме этого выполненными оказываются и остальные целевые условия (7) (см. рис. 3, 4, 6, 7).

Заключение

Рассмотрено решение задачи периодического управления априорно неопределенным нелинейным объектом с запаздыванием. Показано, что использование предложенного комбинированного контура управления позволяет обеспечить высокие качественные показатели работы системы управления при различных параметрах объекта управления, а также действии на него внешних гармонических и непериодических возмущений.

Библиографические ссылки

1. *Repetitive* Control System: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals / Shinji Hara, Yutaka Yamamoto, Tohru Omara, Micho Nakato // IEEE Transactions on automatic control. – 1988. – Vol. 33, №7. – P. 659 – 668.

2. *Generating* Self-Excited Oscillations via Two-Relay Controller / Luis T. Aguilar, Igor Boiko, Leonid Fridman, Rafael Iriarte // IEEE Transactions on automatic control. – 2009. – Vol. 54, №2. – P. 416 – 420.

3. *Zhen Zhang, Andrea Serrani.* Adaptive Robust Output Regulation of Uncertain Linear Periodic Systems // IEEE Transactions on automatic control. – 2009. – Vol. 54, №2. – P.266 – 278.

4. *Еремин Е.Л.* Нелинейные преобразования алгоритмов прямого адаптивного управления непрерывными объектами: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1994.

5. *Еремин Е.Л.* Новый тип алгоритмов параметрической настройки адаптивных регуляторов для систем управления нестационарными T-периодическими объектами. // Информатика и системы управления. – 2003. – №2 (6). – С.100 – 109.

6. *Еремин Е.Л., Капитонова М.С., Чепак Л.В.* Разработка алгоритмического обеспечения адаптивных систем автоматического управления циклического действия // Вестник АмГУ. Сер. «Естественные и экономические науки». Благовещенск, 2004. Вып. 25. С. 39 – 41.

7. *Капитонова М.С.* Адаптивное управление нестационарными объектами в периодическом режиме // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1(9). – С. 136 – 141.

8. *Еремин Е.Л., Капитонова М.С.* Адаптивная система управления *T*-периодическими нелинейными объектами // Проблемы управления. – 2007. – № 1. – С.2 – 7.

9. *Система* адаптивно-периодического управления мехатронным модулем подачи металлорежущих станков / Е.Л. Еремин, М.С. Капитнова, Л.В. Чепак, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2012. – № 2(32). – С. 150 – 159.

10. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А.* Комбинированные алгоритмы системы робастно-периодического управления нелинейным объектом с запаздыванием // Информатика и системы управления. – 2009. – № 3(21). – С. 125 – 135.

11. *Еремин Е.Л., Лелянов Б.Н., Шеленок Е.А.* Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 1(16). – С. 45 – 54.

12. *Шеленок Е.А.* Гибридная система управления нелинейным скалярным объектом в циклических режимах // Информатика и системы управления. – 2010. – № 3(25). – С. 147 – 156.

13. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А.* Циклический режим в системе робастного управления манипулятором Барретта // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 3(18). – С. 23 – 32.

14. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А.* Периодические режимы в схемах децентрализованного адаптивного и робастного управления // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 1(Выпуск 35). – С. 108 – 116.

15. *Еремин Е.Л., Шеленок Е.А.* Управление по выходу с компенсацией гармонических возмущений в условиях априорной неопределенности // Вестник Тихоокеан-

ского государственного университета. – 2011. – № 1(20). – С. 49 – 58.

16. *Шеленок Е.А.* Комбинированные алгоритмы нелинейных систем робастного управления в периодических режимах: Автореф. дис. … канд. техн. наук. - Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2011. – 20 с.

17. *Шеленок Е.А.* Адаптивно-робастная система управления нелинейными объектами периодического действия // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4(34). – С. 128 – 137.

18. *Xin Tang, An Luo, Chunming Tu.* A nonlinear repetitive controller // J Control Theory Appl. – 2012. - № 10(1). – P. 50 – 55.

19. *Optimal* Repetitive Control Based on Two-Dimensional Model / Min Wu, Yonghong Lan, Jinhua She, Yong He, Li Xu //*International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2012.* - Volume 8, Number 3(A). – P. 1897 – 1905.