УДК 684.511

© 2010 г. **Б.Н. Лелянов**, канд. техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),
Д.А. Теличенко, канд. техн. наук,
Е.А. Шеленок
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АПРИОРНО НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО СОСТОЯНИЮ[1]

Рассматривается синтез периодической системы управления нелинейным априорно неопределенным скалярным объектом с запаздыванием по состоянию, для которой на основании критерия гиперустойчивости синтезируется комбинированный закон управления.

Ключевые слова: явно-неявная эталонная модель, априорная неопределенность, стационарный наблюдатель, периодическая система управления, критерий гиперустойчивости.

Введение

Большой интерес проектировщиков автоматических систем управления различного назначения вызывают задачи разработки математического и алгоритмического обеспечения систем, задающие и возмущающие сигналы которых являются периодическими функциями времени, или так называемых периодических систем управления. Исследования проблем построения систем данного типа нашли отражение в работах как отечественных, так и зарубежных авторов. Например, в [1] был предложен регулятор в виде замкнутого контура с блоком запаздывания в обратном канале, с помощью которого осуществлялось построение систем управления, обладающих возможностью адаптации к внешним периодическим воздействиям. В работе [2] с помощью введения в систему дополнительного контура, получившего название «генератор периодических сигналов», была решена задача управления динамическим скалярным объектом в циклических режимах. Также известен способ построения аналогичных систем управления нелинейными объектами, функционирующими в условиях априорной параметрической неопределенности [3], где синтез законов управления базировался на использовании прямого метода Ляпунова. Другие возможные подходы к разработке

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы" в рамках проекта «Адаптивные и робастные системы управления сложными динамическими объектами с запаздыванием» (регистрационный номер: 2.1.2/373).

алгоритмов управления периодическими режимами различных динамических объектов нашли отражение и в более поздних зарубежных научных трудах. Так, в [4] решена задача робастно-периодического управления классом линейных периодических объектов, в работе [5] предложен так называемый «двухрелейный» алгоритм управления, обеспечивающий возникновение на выходе нестационарной системы периодических колебаний с заданной амплитудой и частотой.

В работе [6] было показано, что синтез систем управления циклического действия для динамических априорно неопределенных динамических объектов можно осуществлять на основании критерия гиперустойчивости В.М. Попова, применение которого позволило получить класс адаптивно-периодических алгоритмов управления.

Предложенный способ построения систем получил дальнейшее развитие в работе [7]. Здесь управление априорно неопределенным нелинейным скалярным объектом осуществлялось за счет применения адаптивного регулятора, состоящего из периодических и интегрирующих блоков. Однако использование предложенных алгоритмов оказывалось возможным только в случаях полного измерения внутренних состояний объекта управления.

Решение задач синтеза систем, для которых известными являются входные и выходные сигналы, но не их производные, опирается на применение различных способов получения оценок переменных состояния объекта. В частности, особый интерес представляют системы управления, для технической реализации которых восстановление неизвестных переменных осуществляется с помощью наблюдателей состояния (НС). На современном этапе теория НС (например, наблюдателей Люенбергера, фильтров Калмана) хорошо разработана, и нашла применение во многих работах [8, 9].

Синтез робастных законов управления для системы управления априорно неопределенными неустойчивыми нелинейными объектами с использованием критерия гиперустойчивости, НС полного порядка, а также быстрой явно-неявной эталонной модели подробно рассмотрен в работе [10].

В настоящей статье, исходя из основных результатов работ [6, 7, 10, 11], для системы с малоинерционной явно-неявной эталонной моделью рассматривается решение задачи синтеза комбинированного алгоритма управления априорно неопределенным нелинейным скалярным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию, подверженным воздействию постоянных периодических и непериодических возмущений.

Исходное математическое описание системы

Рассматривается динамический нелинейно-нестационарный скалярный объект с запаздыванием по состоянию, динамические свойства которого описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} &\frac{dx(t)}{dt} = A(t+T,x)x(t) + D(t+T,x)x(t-\tau) + b(t+T)u(t) + f(t), \\ &y(q) = \phi(q),\ q \in [-\tau,0], \quad y(t) = L^T x(t) = x_1(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния системы; $y(t) \in R$ – скалярный выход объекта; $u(t) \in R$ – скалярное управляющее воздействие; $A(t+T,x) = A + b_* \vartheta^T(t+T, x_1(t))$ – нелинейно-нестационарная матрица состояния; $A = A_0 + b_* \chi_0^T$ – стационарная матрица; A_0 – гурвицева матрица; $D(t+T, x_1(t-\tau)) = b_* \delta^T(t+T, x_1(t-\tau))$ – нелинейная матрица с запаздывающим аргументом; $\varphi_i(x_1(t)),\ \psi_i(x_1(t-\tau)),\ i = \overline{1,n}$ – нелинейные функции; $\vartheta^T(t+T, x_1(t)) = [\alpha_1(t+T)\varphi_1(x_1(t)),...,\alpha_n(t+T)\varphi_n(x_1(t))]$, $\delta^T(t+T, x_1(t-\tau)) = [\beta_1(t+T)\psi_1(x_1(t-\tau)),...,\beta_n(t+T)\psi_n(x_1(t-\tau))]$ – нелинейно-нестационарные векторы; $b(t+T) = b_*(1+\rho(t+T))$ – нестационарный вектор управления; $b_*^T = [0,...,0,1]$, $L^T = [1,...,0,0]$ – стационарные векторы; χ_0^T – некоторый вектор; $\rho(t+T) > 0$, $\alpha(t+T)$, $\beta(t+T)$ – неизвестные, ограниченные по величине скалярные T-периодические функции; $\tau = const$ – известное временное запаздывание; $\phi(q)$ – ограниченная начальная функция; $f^T(t) = [0,...,0, f_n(t)]$ – вектор внешних возмущений, причем:

$$\begin{aligned} &f_n(t) = f_{пер}(t) + f_{непер}(t),\\ &|f_n(t)| < f_0 = const, \end{aligned} \tag{2}$$

$f_{пер}(t)$ и $f_{непер}(t)$ – соответственно периодическая и непериодическая составляющая возмущающего воздействия; $f_0 = const$ – некоторое число.

Условия априорной параметрической неопределенности, в которой протекает функционирование объекта (1), описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} &A = A(\xi),\ f(t) = f_\xi(t),\ \rho(t+T) = \rho_\xi(t+T),\ \chi_0 = \chi_0(\xi),\\ &\vartheta(t+T, x_1(t)) = \vartheta_\xi(t+T, x_1(t)),\ \delta(t+T, x_1(t-\tau)) = \delta_\xi(t+T, x_1(t-\tau)), \end{aligned} \tag{3}$$

где ξ – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству Ξ.

Зададим структуру регулятора в комбинированном виде:

$$u(t) = k(u_{пер}(t) + u_{роб}(t)), \tag{4}$$

где $u_{пер}(t)$, $u_{роб}(t)$ – периодическая (адаптивная) и робастная составляющие регулятора соответственно; k – произвольная положительная константа.

Желаемая динамика качества переходных процессов объекта управления (1) задается, аналогично [10], быстрой явно-неявной эталонной моделью вида:

$$\frac{dz_*(t)}{dt} = a_0 z_*(t) + a_0 r(t), \quad y_*(t) = z_*(t), \tag{5}$$

где $z_*(t) \in R$ – эталонная переменная; $y_*(t) \in R$ – выход эталона; $r(t) \in R$ – задающее воздействие, причем: $r(t) = r(t+T)$; $a_0 = const > 0$ – некоторое достаточно большое число.

Известно, что, определяя собственные числа матрицы A_0, а также соответствующие числовые значения некоторого вектора g, используя соотношения

$$\det(pE - A_0) = (p + a_0)^n, \quad g^T(pE - A_0)^+ b_* = a_0(p + a_0)^{n-1}, \tag{6}$$

где p – комплексная переменная; E – единичная матрица соответствующего размера; $(\cdot)^{+}$ – присоединенная матрица; математическое описание эталонной модели (5) можно эквивалентно записать в виде:

$$\frac{dx_*(t)}{dt} = A_0 x_*(t) + b_*(t) r(t+T), \quad v_*(t) = y_*(t) = g^T x_*(t), \tag{7}$$

где $x_*(t) \in R^n$, $v_*(t) \in R$ – вектор переменных состояния и обобщенный выход эталона соответственно.

Выделяя в системе управления (1), (4) линейную стационарную (ЛСЧ) и нелинейную нестационарную (ННЧ) части, ее математическое описание можно представить в виде

$$\begin{gathered}\frac{dx(t)}{dt} = A_0 x(t) + b_* \tilde{\mu}(t), \; y(t) = L^T x(t) = x_1(t), \\ \tilde{\mu}(t) = \vartheta^T(t+T, x_1(t)) x(t) + \delta^T(t+T, x_1(t-\tau)) x(t-\tau) + \\ + k(1+\rho(t+T)) u_{пер}(t) + k(1+\rho(t+T)) u_{роб}(t) + \chi_0^T x(t) + \\ + f_{пер}(t) + f_{непер}(t)\end{gathered} \tag{8}$$

Поскольку видоизмененное управление $\tilde{\mu}(t)$, помимо доступной переменной $x_1(t)$, содержит также другие не доступные измерению переменные состояния, для технической реализации системы (8) необходимо обеспечить восстановление значений недоступных переменных. Для получения оценок вектора состояния $x(t)$ по текущим значениям выхода $y(t)$ воспользуемся стационарным наблюдателем полного порядка:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A_* \bar{x}(t) + b_* u(t) + N y(t), \quad \bar{y}(t) = L^T \bar{x}(t) = \bar{x}_1(t), \; \bar{v}(t) = \bar{g}^T \bar{x}(t), \tag{9}$$

где $\bar{x}(t) \in R^n$ – вектор состояния наблюдателя; $\bar{v}(t) \in R$ – обобщенный выход наблюдателя; $A_* = (A_0 - NL^T)$ – матрица состояния наблюдателя; $\bar{g} = gK^{-1}$; $K = -g^T A_*^{-1} N$ – коэффициент согласования в установившемся режиме значений $\bar{v}(t)$ и $v_*(t)$.

Таким образом, введение дополнительного контура наблюдения (9) позволяет заменить вектор состояния $x(t)$ на его оценку $\bar{x}(t)$ и получить технически реализуемый контур управления [10].

Постановка задачи

Для системы управления (1), (2), (4) с дополнительным контуром наблюдения (9), функционирующей в условиях априорной неопределенности (3), требуется синтезировать алгоритмы управления регулятора (4), такие, что при любых начальных условиях $x(0)$, любых функциях $\varphi(q)$, $q \in [-\tau, 0]$, при действии на объект внешних периодических и непериодических возмущений $f(t)$, а также произвольном изменении функций $\alpha(t+T)$, $\beta(t+T)$ и $\rho(t+T)$ имело бы место выполнение целевых условий:

$$\lim_{t\to\infty} \| y_*(t) - y(t) \| = \lim_{t\to\infty} \| y_*(t) - \bar{y}(t) \| \le \lambda = const > 0,$$
$$\lim_{t\to\infty} u_{пер}(t) = u^*_{пер}(t) = u_{пер}(t+T). \qquad (10)$$

Синтез алгоритмов управления

Построение алгоритмов управления будем осуществлять, используя критерий гиперустойчивости с применением модифицированного интегрального неравенства Попова.

Первый этап синтеза. Необходимым требованием данного этапа является получение эквивалентного математического описания синтезируемой системы. Вводя понятие ошибки, т.е. $e(t) = x_*(t) - \bar{x}(t)$, а также опираясь на математическое описание системы управления (8) и эталонной модели (7), имеем следующее математическое описание эквивалентной системы:

$$\frac{de(t)}{dt} = A_0 e(t) + b_* \mu(t), \; z(t) = g^T e(t),$$
$$\tilde{\mu}(t) = -k(1+\rho(t+T))\left[u_{пер}(t) - \tilde{\upsilon}(t+T)\right] - \chi_0^T \bar{x}(t) - \qquad (11)$$
$$- k(1+\rho(t+T)) u_{роб}(t) - f_{непер}(t),$$

где $\tilde{\upsilon}(t+T) = \dfrac{\upsilon(t+T)}{k(1+\rho(t+T))}$ – периодическая функция;

$$\upsilon(t+T) = r(t+T) + \vartheta^T(t+T, x_1(t))x(t) + \delta^T(t+T, x_1(t-\tau))x(t-\tau) + f_{пер}(t).$$

Второй этап синтеза. Необходимо показать выполнение условий строгой положительности и вещественности ЛСЧ исследуемой системы. Решение указанной проблемы сводится к обеспечению выполнения требований частотного неравенства:

$$\operatorname{Re} W_{ЛСЧ}(j\omega) > 0,$$
$$\forall \omega \in (-\infty; \infty), \qquad (12)$$

справедливость которого для системы (11) очевидна, поскольку передаточная функция ЛСЧ эквивалентной системы имеет вид:

$$W_{ЛСЧ}(p) = g^T (pE - A_0)^{-1} b_* = \frac{g^T (pE - A_0)^+ b_*}{\det(pE - A_0)} = \frac{a_0}{p + a_0},$$

что соответствует передаточной функции апериодического звена первого порядка, для которого частотное условие (12) всегда выполнимо.

Третий этап синтеза связан с выполнением интегрального неравенства Попова (ИНП) вида:

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(s) z(s) ds \ge -\sigma_0^2 = const, \; \forall t > 0. \qquad (13)$$

Для синтеза алгоритмов управления регулятора (4) воспользуемся, аналогично [11], так называемым модифицированным интегральным неравенством Попова (МИНП):

$$\eta^*(0,t) = -\sum_i \int_0^t \mu_i(s) z(s) Q_i(z(s)) ds \ge -\sigma_0^2 = const,\ \forall t > 0,\ i = 1,2... \qquad (14)$$

где $Q_i(z(s))$ – положительно определенные функции.

Опираясь на эквивалентное математическое описание (11), имеем:

$$\eta_1^*(0,t) = k\int_0^t (1+\rho(s+T))\left[u_{пер}(s) - \tilde{\upsilon}(s+T)\right] z(s) ds;$$

$$\eta_2^*(0,t) = k\int_0^t (1+\rho(s+T)) u_{роб}(s) z(s) ds;$$

$$\eta_3^*(0,t) = k\int_0^t \chi_0^T \bar{x}(s) z(s) \,|\, z(s) \,|\, ds;\ \ \eta_4^*(0,t) = k f_0^{-1}\int_0^t f_{непер}(s) z(s) \,|\, z(s) \,|\, ds;$$

Здесь $Q_1(z(s)) = Q_2(z(s)) = 1;\ Q_3(z(s)) = k\,|\,z(s)\,|;\ Q_4(z(s)) = k\ f_0^{-1}\,|\,z(s)\,|$.

Известно [7], что сформировав функцию $u_{пер}(t)$, в виде замкнутого контура:

$$u_{пер}(t) = u(t-T) + \gamma_0 z(t),\ \ \gamma_0 = const > 0, \qquad (15)$$

будем иметь справедливую оценку для интегрального слагаемого $\eta_1^*(0,t)$ вида:

$$\eta_1^*(0,t) = k\gamma_0\int_0^t (1+\rho(s+T)) z(s)\left[\int_0^s \omega_0(s-h) z(h) dh - \tilde{\upsilon}(s+T)\right] ds \ge$$
$$\ge -\sigma_{01}^2 = const > 0,\ \forall t > 0, \qquad (16)$$

где ω_0 – весовая функция генератора периодических сигналов.

Выполним преобразование суммы интегральных слагаемых $\eta_2^*(0,t)$, $\eta_3^*(0,t)$ и $\eta_4^*(0,t)$ следующим образом:

$$\eta_2^*(0,t) + \eta_3^*(0,t) + \eta_4^*(0,t) = k\int_0^t u_{роб}(t)(1+\rho(s+T)) z(s) +$$
$$+ k\int_0^t \chi_0^T \bar{x}(s) z(s) \,|\, z(s) \,|\, ds \pm k\gamma_1\int_0^t \sum_{i=1}^n |\,\bar{x}_i(s)\,|(1+\rho(s+T))\,|\,z(s)\,|^2\ ds +$$
$$+ k\ f_0^{-1}\int_0^t f_{непер}(s) z(s) \,|\, z(s) \,|\, ds \pm k\gamma_2\int_0^t (1+\rho(s+T))\,|\,z(s)\,|^2\ ds \ge \qquad (17)$$
$$\ge k\int_0^t \left[u_{роб}(t)\operatorname{sgn} z(s) - \gamma_1\sum_{i=1}^n |\,\bar{x}_i(s)\,\|\,z(s)\,| - \gamma_2\,|\,z(s)\,|\right](1+\rho(s+T))\,|\,z(s)\,|\, ds,$$

где $\gamma_1 = \sup \|\,\chi_0\,\|^2 = const > 1;\ \gamma_2 = const > 1;\ \operatorname{sgn} z(s)$ – функция знака сигнала $z(s)$.

Таким образом, определив явный вид робастной составляющей алгоритма управления (4) как

$$u_{роб}(t)=[\gamma_1\sum_{i=1}^{n}|\bar{x}_i(t)|+\gamma_2], \qquad (18)$$

имеем справедливую оценку для выражения (17):

$$\eta_2^*(0,t)+\eta_3^*(0,t)+\eta_4^*(0,t)\geq -\sigma_{02}^2=const,\ \forall t>0. \qquad (19)$$

Следовательно, поскольку существуют оценки (16), (19), то будет иметь место выполнение МИНП (14), а значит и ИНП (13).

Четвертый этап синтеза. Необходимо в эквивалентной системе (11), (15), (18) показать выполнение предельных целевых условий (10), что означает выполнение этих же условий для исходной системы (1), (4), (15), (18).

Поскольку, как было показано на втором и третьем этапах синтеза, для системы (11), (15), (18) выполнено частотное условие (11), а также требования МИНП (14), из чего следует выполнение неравенства (13), то синтезированная система является гиперустойчивой в заданном классе Ξ и для нее выполняются целевые условия (10).

Таким образом, аналитическое конструирование рассматриваемой системы управления можно считать завершенным. Перейдем к заключительному этапу проектирования системы – имитационному моделированию. Здесь необходимо осуществить выбор коэффициентов регулятора таким образом, чтобы при заданных исходных значениях матриц и векторов в синтезированной системе управления имело место выполнение предельных целевых условий (10).

Иллюстративный пример

Для подтверждения работоспособности синтезированных алгоритмов управления (15), (18), а также оценки качества функционирования системы рассмотрим комбинированную систему управления (1), (4), (15), (18) при следующих исходных данных:

$$A(t+T,x)=\begin{pmatrix}0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\\a_1&a_2&a_3&a_4\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\a_{11}(t,x_1)&a_{12}(t,x_1)&a_{13}(t,x_1)&a_{14}(t,x_1)\end{pmatrix};$$

$a_1=15;\ a_2=20;\ a_3=-50;\ a_3=-10;$

$T=2;\ \tau=3;$

$a_{11}(t,x_1)=\alpha_1(t+T)\varphi_1(x_1(t));\qquad \alpha_1(t+T)=0.5\sin 5\pi t;$

$a_{12}(t,x_1)=\alpha_2(t+T)\varphi_2(x_1(t));\qquad \alpha_2(t+T)=\sin 5\pi t;$

$a_{13}(t,x_1)=\alpha_3(t+T)\varphi_3(x_1(t));\qquad \alpha_3(t+T)=0.2\sin 5\pi t;$

$a_{14}(t,x_1)=\alpha_4(t+T)\varphi_4(x_1(t));\qquad \alpha_4(t+T)=1.4\sin 5\pi t;$

$\varphi_1(x_1(t))=x_1(t);\ \varphi_2(x_1(t))=|x_1^2(t)|;$

$\varphi_3(x_1(t))=x_1^3(t);\ \varphi_4(x_1(t))=x_1^5(t);$

$$D(t+T, x_1(t-\tau)) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{11}(t,\tau,x_1) & d_{12}(t,\tau,x_1) & d_{13}(t,\tau,x_1)) & d_{14}(t,\tau,x_1) \end{pmatrix};$$

$$d_{11}(t,\tau,x_1) = \beta_1(t+T)\psi_1(x_1(t-\tau)); \qquad \beta_1(t+T) = 0.1\sin 5\pi t;$$

$$d_{12}(t,\tau,x_1) = \beta_2(t+T)\psi_2(x_1(t-\tau)); \qquad \beta_2(t+T) = 1.5\sin 5\pi t;$$

$$d_{13}(t,\tau,x_1) = \beta_3(t+T)\psi_3(x_1(t-\tau)); \qquad \beta_3(t+T) = 0.7\sin 5\pi t;$$

$$d_{14}(t,\tau,x_1) = \beta_4(t+T)\psi_4(x_1(t-\tau)); \qquad \beta_4(t+T) = 0.2\sin 5\pi t;$$

$$\psi_1(x_1(t-\tau)) = | x_1(t-\tau) |; \ \psi_2(x_1(t-\tau)) = x_1^2(t-\tau);$$

$$\psi_3(x_1(t-\tau)) = | x_1^3(t-\tau) |; \psi_4(x_1(t-\tau)) = x_1^4(t-\tau);$$

$$b^T(t+T) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & b_4(t+T) \end{pmatrix};$$

$$b_4(t+T) = b_4 + \rho(t+T); \ \rho(t+T) = 0.1 | \sin 0.5t |; \ b_3 = 1;$$

$$f^T(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & f_{пер}(t+T) + f_{непер}(t) \end{pmatrix};$$

$$f_{пер}(t) = 0.1 \cdot e^{\sin \pi t} - 0.3; \ f_{непер}(t) = 0.1\sin(e^{-0.23\,t}\sin t - 1.5)t;$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = r_0(r(t) - \tilde{r}(t)), \ r_0 = -0.005, \ \tilde{r}(t) = 0.2 \cdot e^{0.5(1-\cos \pi t)+\cos(0.5\,\pi t)} - 0.3.$$

Для явно-неявной эталонной модели (5) значение коэффициента a_0 равно 12, что соответствует заданию для матрицы A_0 собственных чисел: $p_{01} = p_{02} = p_{03} = p_{04} = -12$, а также значений [20736 5184 432 12] для вектора g^T, формирующего обобщенный выход эталонной модели $v_*(t)$. В данном случае рассматриваемую эталонную модель можно считать быстродействующей, что означает практически полное совпадение задающего воздействия $r(t)$ и обобщенного выхода эталона $v_*(t)$, а поскольку указанные динамические процессы совпадают, то допускается вместо явно-неявного эталона использовать неявную эталонную модель.

Необходимое для расчета параметров наблюдателя значение спектра матрицы A_* задано существенно левее спектра матрицы A_0, в рассматриваемом случае со значением (–60). Таким образом, при известных матрицах A_0, A_* и L^T, значения матрицы N, коэффициента согласования K, а также вектора $\bar{g}$ примут вид:

$$N^T = \begin{pmatrix} 192 & 11520 & 138240 & -4976640 \end{pmatrix};$$

$$K = 8494;$$

$$\bar{g}^T = \begin{pmatrix} 2.4415 & 0.6104 & 0.0509 & 0.0014 \end{pmatrix}.$$

При проведении нескольких этапов имитационного моделирования были выбраны следующие числовые значения параметров контура управления:

$\gamma_0 = 70;\ \gamma_1 = 150;\ \gamma_2 = 70;$

$k = 50.$

Результаты имитационного моделирования рассматриваемой системы с неявным эталоном приведены на рис. (1) – (4).

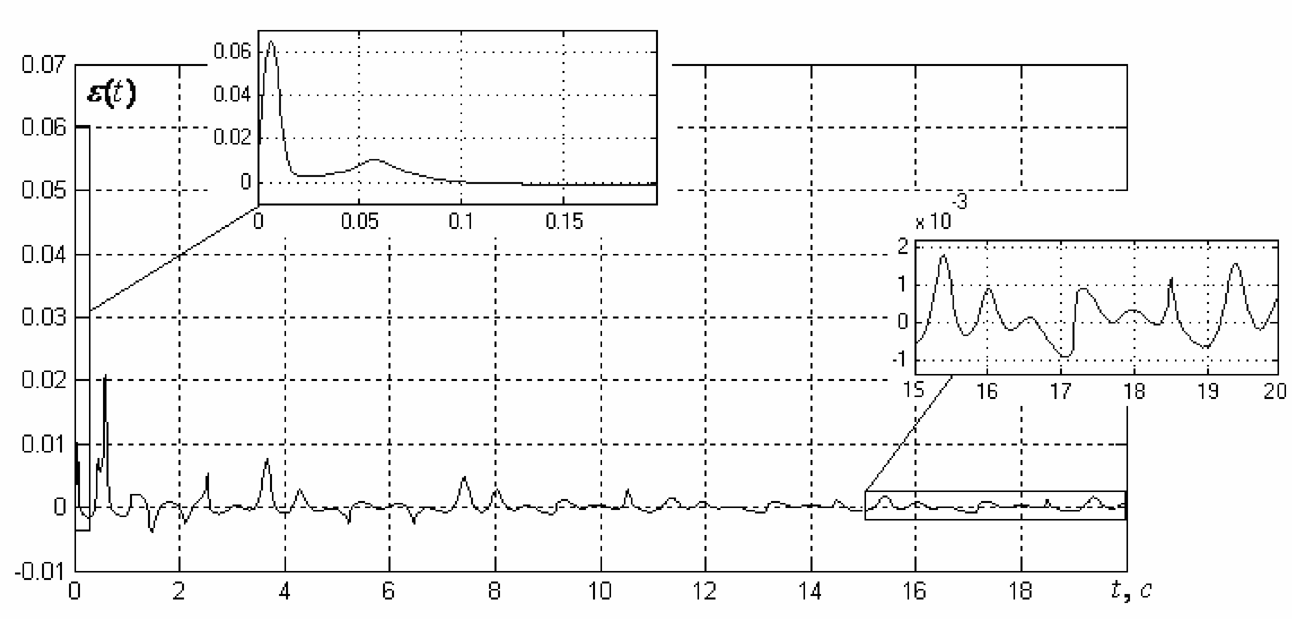

Рис. 1. Ошибка регулирования.

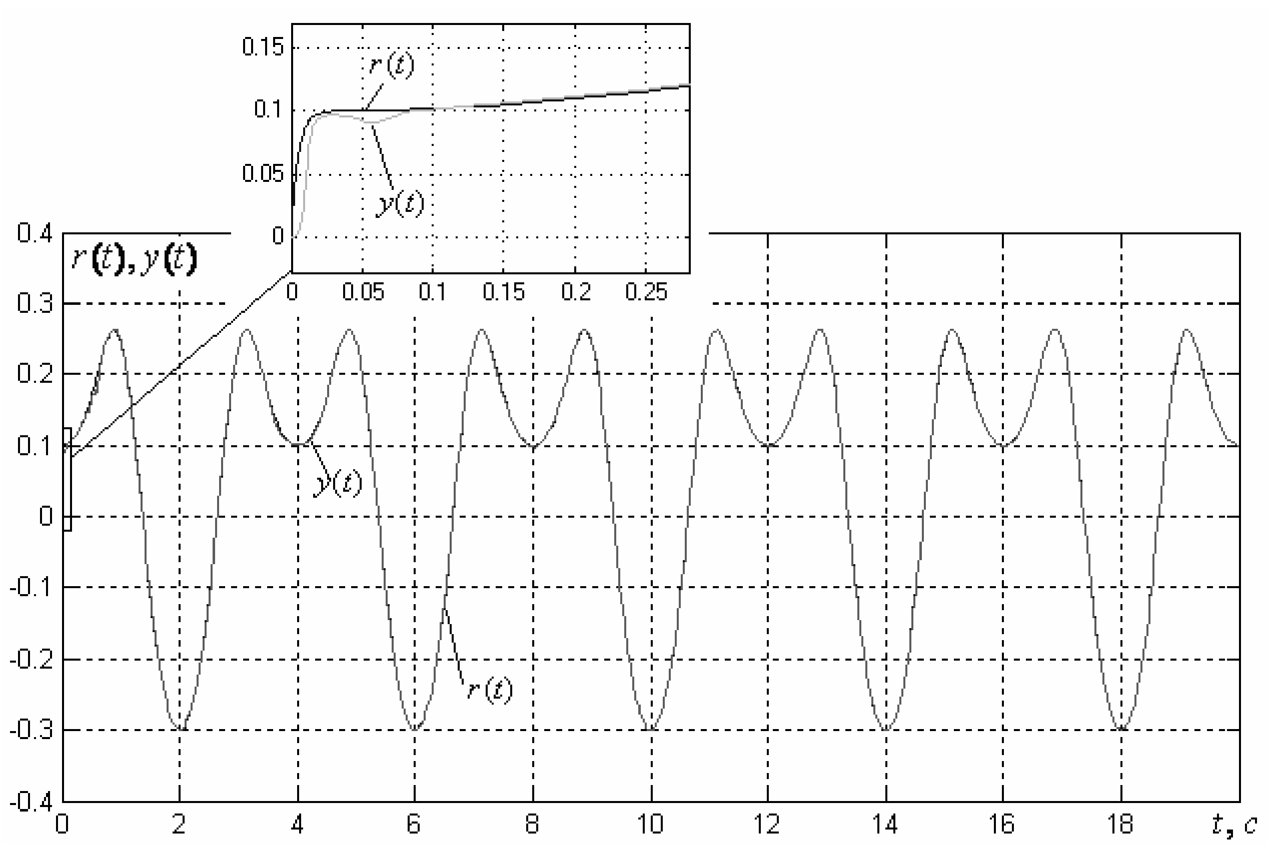

Рис. 2. Задающее воздействие и выход системы.

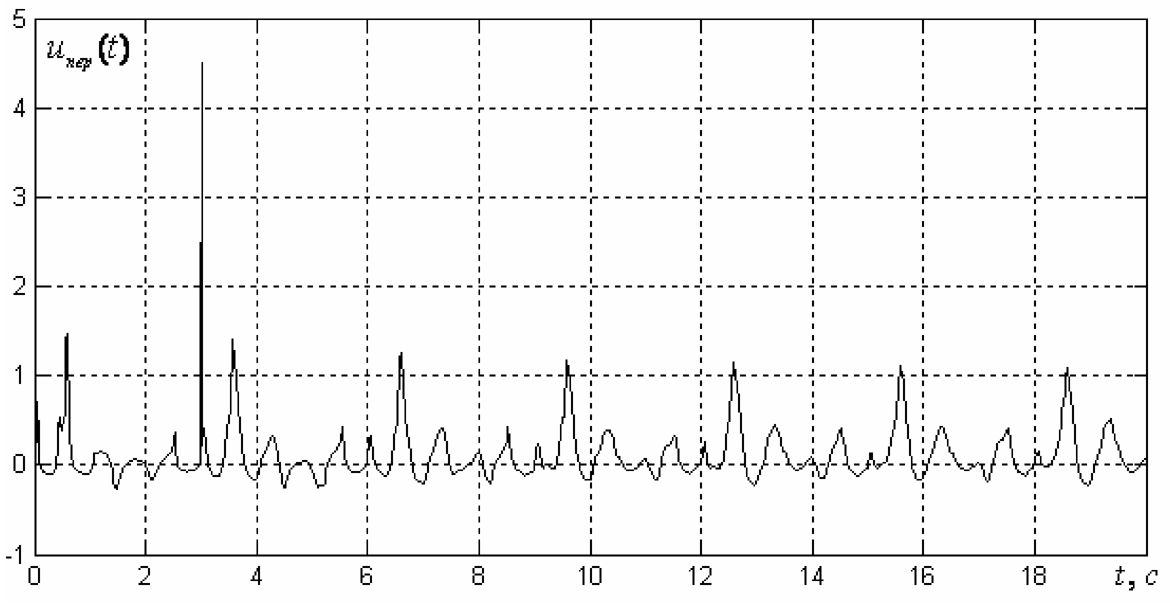

Рис. 3. Динамика настройки параметра $u_{пер}(t)$.

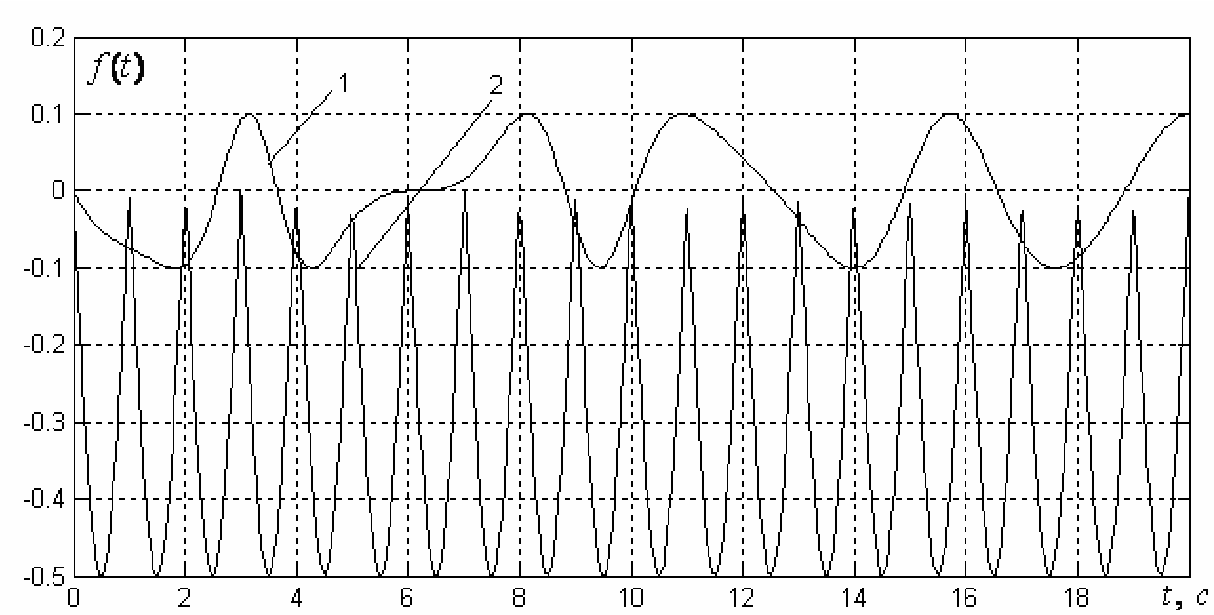

Рис. 4. Возмущающее воздействие (1 – непериодическая часть; 2 – периодическая часть).

Результаты проведенного вычислительного эксперимента подтверждают высокую эффективность синтезированного комбинированного алгоритма управления, поскольку, наряду с выполнением целевых требований, отражают и достаточно хорошее качество функционирования системы управления (ошибка регулирования в установившемся режиме не превышает 0,2%).

Заключение

Решена задача управления нелинейно-нестационарным априорно неопределенным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию и подверженного действию постоянных периодических и непериодических помех, для которого с помощью дополнительного контура наблюдения, а также критерия гиперустойчивости синтезирован комбинированный робастно-периодический алгоритм, обладающий относительно несложной структурой и обеспечивающий хорошие динамические характеристики систем управления сложными динамическими объектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Закс В.С.* Об одной возможности повышения точности регулирования в следящих системах циклического действия // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 1. – С. 170 – 174.
2. *Shinji Hara, Yutaka Yamamoto, Tohru Omara, 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.
3. *Jiang Y.A., Clements D.J., Hesketh T.* Adaptive Repetitive Control of Nonlinear Systems // IEEE Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control. – 1993. – P. 1708 – 1713.
4. *Zhang Zheng, Serrani Andrea.* Adaptive Robust Output Regulation Of Uncertain Linear Periodic Systems // IEEE Transactions on automatic control. – 1988. – Vol. 54, N 2. – P. 266 – 278.
5. *Generating* Self-Excited Osstillations via Two-Relay Controller / Luis T. Aguilar, Igor Boiko, Leonid Fridman, Rafael Iriarte // IEEE Transactions on automatic control. – 2009. – Vol. 54, N 2. – P. 416 – 420.
6. *Еремин Е.Л.* Нелинейные преобразования алгоритмов прямого адаптивного управления непрерывными объектами: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1994. – 35 с.
7. *Еремин Е.Л., Капитонова М.С.* Адаптивная система управления *T*-периодическими нелинейными объектами // Проблемы управления. – 2007. – № 1. – С. 2 – 7.
8. *Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В.* Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
9. *Краснова С.А.* Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2003. – 38 с.
10. *Еремин Е.Л., Кван Н.В., Семичевская Н.П.* Робастное управление нелинейным объектом со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью // Информатика и системы управления. – 2008. – № 4(18). – С. 122 – 130.
11. *Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Семичевская Н.П.* Нелинейное робастное управление нестационарными объектами. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Л. Ереминым.

E-mail:
Лелянов Б.Н. – bnl@ais.khstu.ru;
Теличенко Д.А. – telichenko@yandex.ru;
Шеленок Е.А. – cidorshell@rambler.ru.