

УДК 684.511

СИСТЕМА НЕЛИНЕЙНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕАФФИННОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ*

Е. Л. Еремин¹, Е. А. Шеленок²

¹Амурский государственный университет,
675000, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21

²Тихоокеанский государственный университет,
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

E-mail: ereminel@mail.ru

cidshell@mail.ru

Рассматривается задача построения робастного регулятора для системы управления неаффинным по входу априорно неопределённым нестационарным динамическим объектом. С помощью имитационного моделирования иллюстрируется качество работы построенной системы управления.

Ключевые слова: робастное управление, априорная неопределённость, неаффинный по управлению объект, нестационарность, критерий гиперустойчивости, L -диссипативность.

DOI: 10.15372/AUT20170207

Введение. Среди многообразия проблем современной теории управления можно выделить класс задач, касающихся разработки регуляторов для так называемых неаффинных по управлению динамических объектов. Необходимость создания подобных систем управления, прежде всего, связана с достаточно широким практическим распространением объектов, математические модели которых являются нелинейными (или неаффинными) по управлению. Например, подобные объекты встречаются в задачах управления подводными аппаратами [1], системах электромагнитной левитации [2], системах позиционирования маятников [3] и других. К настоящему моменту известен достаточно обширный список публикаций, посвящённых вопросам проектирования систем для неаффинных объектов различного назначения [4–10]. Так, в [4] с использованием оценок неопределённости и внешних возмущений решается задача робастного управления для класса неаффинных нелинейных систем. В [5] для неопределённых нелинейных объектов рассмотрено решение задачи построения следящей системы за счёт введения в основной контур управления нелинейного наблюдателя возмущений. Работа [6] посвящена проектированию и применению оптимального регулятора для системы управления неаффинными объектами. В [7] с использованием методов нечёткой логики для неаффинного объекта строится система адаптивного управления. В [8] с помощью метода разделения движений описана процедура синтеза нелинейной системы при наличии широтно-импульсного модулятора в канале управления.

Как показано в [9, 10], проектирование неаффинных систем управления можно осуществлять на основании критерия гиперустойчивости и условий L -диссипативности с использованием методики разработки аффинных систем [11–16]. В [9] рассмотрена задача синтеза робастного закона управления для неаффинной системы с известными нелинейными характеристиками управляемого объекта, а в [10] предложен робастный регулятор для

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00871).

нестационарного неаффинного объекта, функционирующего в условиях неопределённости и действия внешних возмущений.

В данной работе, опираясь на результаты [9–16], решается задача построения робастного регулятора для системы управления классом неаффинных нестационарных динамических объектов, содержащих известное запаздывание по состоянию.

Описание исходной системы управления. Рассматривается неаффинный по управлению нестационарный динамический объект, движение которого описывается с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} dx(t)/dt &= Ax(t) + B(t)(\alpha^T(t)x(t) + \beta^T(t)x(t - \tau) + \varphi(u(t)) + u(t)f(u(t), x(t))) + \psi(t); \\ y(t) &= x_1(t); \quad x(q) = \vartheta(q), \quad q \in [-\tau; 0]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$ — вектор переменных состояния; A — верхнетриangularная матрица; $B(t) = [0, \dots, 0, b_n(t)]^T$, $\alpha^T(t) = [\alpha_0(t), \alpha_1(t), \dots, \alpha_{n-1}(t)]$, $\beta^T(t) = [\beta_0(t), \beta_1(t), \dots, \beta_{n-1}(t)]$ — нестационарные векторы, элементы которых являются ограниченными и определёнными с точностью до диапазонов:

$$0 < b_n^- \leq |b_n(t)| \leq b_n^+; \quad |\alpha_i(t)| \leq \alpha_i^+; \quad |\beta_i(t)| \leq \beta_i^+, \quad \forall t \geq 0 \quad (2)$$

($b_n^-, b_n^+, \alpha_i^+, \beta_i^+$ — известные числа, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$); $u(t) \in R$ — скалярное управляющее воздействие; $\psi(t) = [0, \dots, \psi_n(t)]$ — вектор внешних постоянно действующих возмущений с ограниченным по величине элементом

$$|\psi_n(t)| \leq \psi_0, \quad \psi_0 = \text{const}, \quad \forall t \geq 0 \quad (3)$$

(ψ_0 — известное число); $\varphi(u(t))$ и $f(u(t), x(t))$ — гладкие нелинейные функции, удовлетворяющие неравенствам

$$|\varphi(u(t))| \leq \varphi_0, \quad \varphi_0 = \text{const}; \quad f(u(t), x(t)) \geq f_0, \quad f_0 = \text{const} > 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

(φ_0, f_0 — известные величины); $\vartheta(q)$ — ограниченная начальная функция; $\tau = \text{const} > 0$ — известное временное запаздывание; $y(t) \in R$ — скалярный выход объекта.

Работа рассматриваемого объекта управления (1)–(4) протекает при следующих допущениях: непосредственному измерению доступен только выходной сигнал $y(t)$; относительный порядок объекта известен и равен n .

Желаемая динамика объекта (1)–(4) определяется аналогично [10] с помощью явной эталонной модели вида

$$dx_M(t)/dt = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad (5)$$

$$y_M(t) = x_{M1}(t), \quad (6)$$

$$z_M(t) = g^T x_M(t), \quad (7)$$

где $x_M(t) = [x_{M1}(t), x_{M2}(t), \dots, x_{Mn}(t)]^T \in R^n$ — вектор эталонных переменных состояния; $B_M = [0, \dots, 0, b_{Mn}]^T$, $b_{Mn} = \text{const} > 0$; $r(t) \in R$ — скалярный командный сигнал; $y_M(t) \in R$ и $z_M(t) \in R$ — основной и вспомогательный скалярные выходы эталонной модели; g — заданный вектор соответствующей размерности; $A_M = (A - B_M \alpha_M^T)$ — гурвицева

матрица в форме Фробениуса, $\alpha_M = [\alpha_{M0}, \alpha_{M1}, \dots, \alpha_{M(n-1)}]^T$ — вектор с заданными числами.

Отметим, что применение эталона (5)–(7) позволяет, во-первых, задать требуемую динамику объекта управления (аналог основной эталонной модели), которая в изображениях по Лапласу запишется в виде

$$y_M(s) = L^T (sE - A_M)^{-1} B_M r(s) = [b_{Mn}/\alpha_M(s)]r(s), \quad (8)$$

и, во-вторых, за счёт эталона

$$z_M(s) = g^T (sE - A_M)^{-1} B_M r(s) = [b_{Mn}g(s)/\alpha_M(s)]r(s) \quad (9)$$

определить желаемую динамику основного контура системы управления (аналог вспомогательной эталонной модели) [10, 14]. В выражениях (8), (9) $L^T = [1, 0, \dots, 0]$; s — комплексная переменная; E — единичная матрица соответствующего размера.

Постановка задачи. Для рассматриваемого нестационарного неаффинного по управлению динамического объекта (1)–(4) с помощью явной эталонной модели (5)–(9) необходимо определить явный вид закона управления:

$$u(t) = u(x(t), x(t - \tau), r(t)), \quad (10)$$

обеспечивающего при любых начальных условиях $x_0 = x(0)$, а также любом уровне априорной параметрической неопределённости (2)–(4) требуемую точность слежения выхода объекта $y(t)$ за эталонным сигналом $y_M(t)$ и выполнение целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta y(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - y(t)| \leq \Delta_y, \quad \Delta_y = \text{const} > 0, \quad (11)$$

где Δ_y — малая величина.

Метод решения, робастный закон управления и условия L -диссипативности системы. С учётом особенностей рассматриваемого динамического объекта построение системы управления будем осуществлять поэтапно. Во-первых, в предположении доступности внутренних состояний $x(t)$ объекта (1)–(4) с использованием критерия гиперустойчивости выполним синтез явного вида закона управления (10). Во-вторых, введём в основной контур системы управления фильтр-корректор, позволяющий получить вектор оценок $\tilde{x}(t)$ неизмеримых переменных состояния объекта, которые будут использоваться для построения технически реализуемого робастного регулятора, и определим условия L -диссипативности в целях обеспечения работоспособности созданной системы.

Синтез робастного закона управления. Для определения явного вида закона управления (10) воспользуемся типовой схемой критерия гиперустойчивости. Введём в рассмотрение вектор рассогласования переменных состояния эталона $x_M(t)$ и объекта управления $x(t)$: $e(t) = x_M(t) - x(t)$. Кроме того, для объекта (1) определим сигнал вспомогательного выхода $z(t) = g^T x(t)$. Схема рассматриваемой системы управления представлена на рис. 1, где $\Delta y(t)$ — сигнал ошибки по основному выходу (для объекта), $v(t)$ — сигнал ошибки по вспомогательному выходу (для основного контура).

В этом случае эквивалентное математическое описание синтезируемой системы примет вид

$$\begin{aligned} de(t)/dt &= A_M e(t) + B_M \mu(t); \quad v(t) = g^T e(t); \quad \Delta y(t) = y_M(t) - y(t), \\ \mu(t) &= -b_{Mn}^{-1} \{ b_n(t) ((\alpha_M + \alpha(t))^T x(t) + \beta^T(t) x(t - \tau) + \\ &+ \varphi(u(t)) + f(u(t), x(t))) + \psi_n(t) \} + r(t), \end{aligned} \quad (12)$$

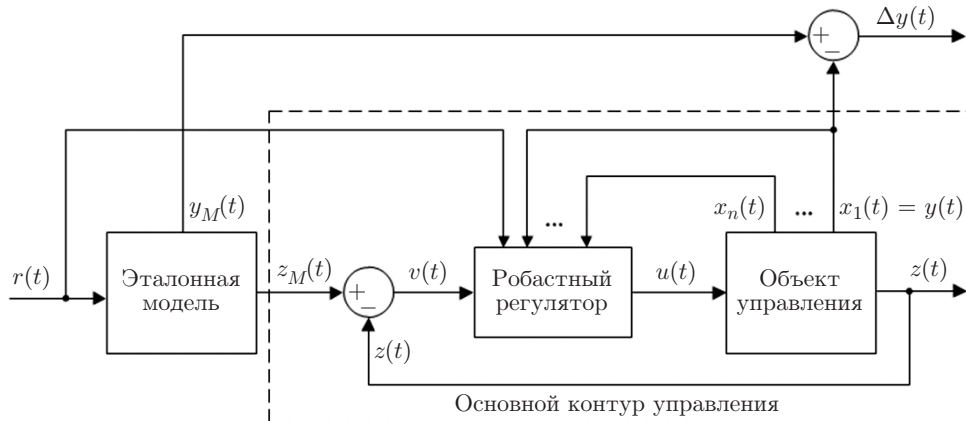


Рис. 1. Структурная схема системы (1), (5)–(7), (10)

где $\mu(t)$ — видоизменённое управление.

Рассматривая выход основного контура управления $z(t)$ в качестве выхода системы, потребуем, чтобы для линейной части системы (12) было обеспечено выполнение частотного условия

$$\operatorname{Re}[W(j\omega)] > 0, \quad \forall \omega. \quad (13)$$

Здесь $W(j\omega) = (g^T(j\omega E - A_M)^+ B_M) / (\det(j\omega E - A_M))$ — частотная передаточная функция линейной стационарной части; для нелинейной части системы (12) выполнялось интегральное неравенство В. М. Попова

$$\eta(0, t) = - \int_0^t \mu(\varsigma) v(\varsigma) d\varsigma \geq -h_0, \quad h_0 = \text{const}, \quad \forall t > 0. \quad (14)$$

Справедливость частотного условия (13) для линейной стационарной части исследуемой системы в соответствии, например, с [9–13] можно обеспечить за счёт выбора коэффициентов полинома $g(s)$ из выражения

$$\begin{aligned} \alpha_M(s) &= (s + \alpha_*)g(s) = (s + \alpha_*)(s^{n-1} + [g_{(n-2)}/g_{(n-1)}]s^{n-2} + \dots \\ &\dots + [g_1/g_{(n-1)}]s + g_{(n-1)}^{-1})g_{(n-1)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где α_* — любой корень полинома $\alpha_M(s)$.

В этом случае уравнение линейной части системы будет соответствовать математическому описанию инерционного звена первого порядка

$$v(s) = g^T (sE - A_M)^{-1} B_M \mu(s) = [b_{Mn} g(s) / \alpha_M(s)] \mu(s) = [b_{Mn} \alpha_* / (s + \alpha_*)] \mu(s),$$

для которого всегда выполнимо неравенство (13):

$$\operatorname{Re}[W(j\omega)] = \operatorname{Re}[b_{Mn} \alpha_* / (\alpha_* + j\omega)] = \alpha_* \left(\sqrt{b_{Mn} / (\alpha_*^2 + \omega^2)} \right) > 0, \quad \forall \omega.$$

Заметим, что подбор коэффициентов вектора $g(s)$ в соответствии с условием (15) также обеспечит упрощение структурной реализации вспомогательного эталона (9), уравнение которого преобразуется к виду

$$z(s) = [b_{Mn}\alpha_*/(s + \alpha_*)]r(s). \quad (16)$$

По аналогии с методикой, изложенной в работе [10], можно показать, что выполнение интегрального неравенства (14), левая часть которого согласно (12) примет вид

$$\begin{aligned} \eta(0, t) = & b_{Mn}^{-1} \int_0^t b_n(\varsigma)(\alpha_M + \alpha(\varsigma))^T x(\varsigma)v(\varsigma)d\varsigma + b_{Mn}^{-1} \int_0^t b_n(\varsigma)\beta^T(\varsigma)x(\varsigma - \tau)v(\varsigma)d\varsigma + \\ & + b_{Mn}^{-1} \int_0^t (b_n(\varsigma)\varphi(u(\varsigma)) + \psi_n(\varsigma))v(\varsigma)d\varsigma + b_{Mn}^{-1} \int_0^t b_n(\varsigma)u(\varsigma)f(u(\varsigma), x(\varsigma))v(\varsigma)d\varsigma - \int_0^t r(\varsigma)v(\varsigma)d\varsigma, \end{aligned}$$

будет обеспечиваться за счёт синтеза робастного закона управления в виде

$$u(t) = \left(h_1 r^2(t) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{2i} x_{k+1}^2(t) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{3i} x_{k+1}^2(t - \tau) + h_4 \right) v(t),$$

$$h_1 = \text{const} \geq 0, \quad h_{2k} = \text{const} \geq 0, \quad h_{3k} = \text{const} \geq 0, \quad h_4 = \text{const} \geq 0. \quad (17)$$

Таким образом, из выполнения требований (13) и (14) следует, что система управления (1)–(7), (17) будет гиперустойчивой в заданном классе неопределённости (2)–(4) и для неё окажутся достижимыми вспомогательная

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |v(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |g^T e(t)| \leq \Delta_z, \quad \Delta_z = \text{const} > 0,$$

где Δ_z — малая величина, и основная (11) цели функционирования [10, 13].

L-диссипативность системы управления. В целях технической реализуемости закона управления (17) подключим к выходу объекта управления фильтр-корректор с динамикой, заданной соотношениями

$$dx_F(t)/dt = A_F x_F(t) + B_F y(t); \quad z_F(t) = C_F^T x_F(t) + D_F y(t), \quad (18)$$

$$W_F(s) = z_F(s)/y(s) = C_F^T (sE_{(n-1)} - A_F)^{-1} B_F + D_F = g(s)/(Ts + 1)^{n-1}, \quad (19)$$

где $x_F(t) = [x_{F1}(t), x_{F2}(t), \dots, x_{F(n-1)}(t)]^T \in R^{n-1}$ — переменные состояния фильтра-корректора, совпадающие с оценками переменных состояния объекта управления; $z_F(t) \in R$ — выход фильтра; A_F , D_F и B_F , C_F — соответственно матрицы и векторы, элементы которых заданы таким образом, что передаточную функцию фильтра (18) можно представить в виде (19).

Введение фильтра-корректора приведёт к потере гиперустойчивости системы (1)–(9), (17)–(19) в силу наличия в основном контуре управления блока структурного возмущения

$z_F(s) = [1/(Ts + 1)^{n-1}]z(s)$. Однако за счёт выбора числового значения параметра T аналогично [9–16] из условий

$$T < T_1 = 0,93/[(n-2)\alpha_{M1}]; \quad T < T_2 = [0,465\alpha_{M1}]/[(n-1)\alpha_{M2}] \quad (20)$$

система управления (1)–(9), (17)–(19) окажется L -диссипативной, что обеспечит ей работоспособность в заданном классе априорной неопределённости. При этом технически реализуемый робастный закон управления (17) запишется следующим образом:

$$u(t) = \left(h_1 r^2(t) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{2i} \tilde{x}_{k+1}^2(t) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{3i} \tilde{x}_{k+1}^2(t - \tau) + h_4 \right) v(t),$$

$$h_1 = \text{const} \geq 0, \quad h_{2k} = \text{const} \geq 0, \quad h_{3k} = \text{const} \geq 0, \quad h_4 = \text{const} \geq 0, \quad (21)$$

где $\tilde{x}(t) = [x_{F1}(t), x_{F2}(t), \dots, \dot{x}_{F(n-1)}(t)] \in R^n$ — вектор, значения элементов которого соответствуют оценкам переменных состояния объекта (1).

Имитационное моделирование системы управления. В качестве примера работы системы управления (1)–(9), (18), (19), (21) рассмотрим задачу управления нестационарным объектом (1)–(4), динамические свойства которого заданы с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); & \dot{x}_2(t) &= x_3(t); \\ x_3(t) &= b_3(t)[\alpha_0(t)x_1(t) + \alpha_1(t)x_2(t) + \alpha_2(t)x_3(t) + \beta_0(t)x_1(t - \tau) + \\ &+ \beta_1(t)x_2(t - \tau) + \beta_2(t)x_3(t) + \varphi(u(t)) + u(t)f(u(t), x(t))] + \psi_3(t); \\ y(t) &= x_1(t); \quad \tau = 2; \quad x_1(0) = 0; \quad x_2(0) = 0,2; \quad x_3(0) = 0,1; \\ \alpha_0(t) &= 0,2 \cos(1,3t); \quad \alpha_1(t) = 0,8 \cos(1,5t); \quad \alpha_2(t) = 1,3 \sin(0,7t); \\ \beta_0(t) &= 0,2 \cos(0,7t); \quad \beta_1(t) = 0,5 \sin(2,5t); \quad \beta_2(t) = 0,01 \sin(0,2t); \\ b_3(t) &= 1,6 - \sin(1,5t); \quad \psi_3(t) = 0,2 \cos(1,5t); \quad \varphi(u(t)) = \tanh(0,2u(t)); \\ f(u(t), x(t)) &= 1/[1 + |u(t)|] + 1,5(1 + x_1^2(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

Уровень априорной неопределённости рассматриваемого объекта (1), (22) задан следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} |\alpha_0(t)| &\leq \alpha_0^+ = 0,4; \quad |\alpha_1(t)| \leq \alpha_1^+ = 1; \quad |\alpha_2(t)| \leq \alpha_2^+ = 1,3; \quad |\beta_0(t)| \leq \beta_0^+ = 0,5; \\ |\beta_1(t)| &\leq \beta_1^+ = 0,7; \quad |\beta_2(t)| \leq \beta_2^+ = 0,1; \quad b_3^- = 0,1 \leq |b_3(t)| \leq 2,5 = b_3^+; \\ |\psi_3(t)| &\leq \varepsilon_{01} = 0,4; \quad |\varphi(u(t))| \leq \varepsilon_{02} = 1,5; \quad f(u(t), x(t)) \geq \varepsilon_{03} = 1. \end{aligned} \quad (23)$$

К выходу объекта (1), (22), (23) подключён динамический фильтр-корректор:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{F1}(t) &= x_{F2}(t); \quad \dot{x}_{F2}(t) = -250000x_{F1}(t) - 1000x_{F2}(t) + 250000y(t); \\ z_F(t) &= 2x_{F1}(t) + 3x_{F2}(t) + \dot{x}_{F2}(t); \quad x_{F1}(0) = x_{F2}(0) = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Требуемая динамика объекта (1), (22), (23) и основного контура системы управления (1), (22)–(24) формируется явной эталонной моделью с двумя выходами:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{M1}(t) &= x_{M2}(t); & \dot{x}_{M2}(t) &= x_{M3}(t); \\ \dot{x}_{M3}(t) &= -10x_{M1}(t) - 17x_{M2}(t) - 8x_{M3}(t) + 5r(t); \\ y_M(t) &= x_{M1}(t); & z_M(t) &= 2x_{M1}(t) + 3x_{M2}(t) + x_{M3}(t); \\ x_{M1}(0) &= x_{M2}(0) = x_{M3}(0) = 0; & r(t) &= \sin(2,5t) + \cos(0,7t). \end{aligned} \tag{25}$$

В ходе имитационного моделирования для увеличения быстродействия системы управления (1), (21)–(25) были подобраны коэффициенты робастного регулятора, уравнение которого приняло вид

$$\begin{aligned} u(t) &= (20x_{F1}^2(t) + 10x_{F2}^2(t) + 15x_{F1}^2(t - 2) + 17x_{F2}^2(t - 2) + \\ &+ 0,01\dot{x}_{F2}^2(t - 2) + 12r^2(t) + 102)(z_M(t) - z_F(t)). \end{aligned} \tag{26}$$

Результаты вычислительного эксперимента, представленные на рис. 2–4, показывают, что в рассматриваемой системе управления (1), (21)–(26) обеспечивается достижение поставленной цели управления (11): величина рассогласования $\Delta y(t)$ практически с начального момента времени функционирования составляет приблизительно 0,6 % (см. рис. 2, 3). При этом в системе формируется достаточно качественный сигнал управления (см. рис. 4).

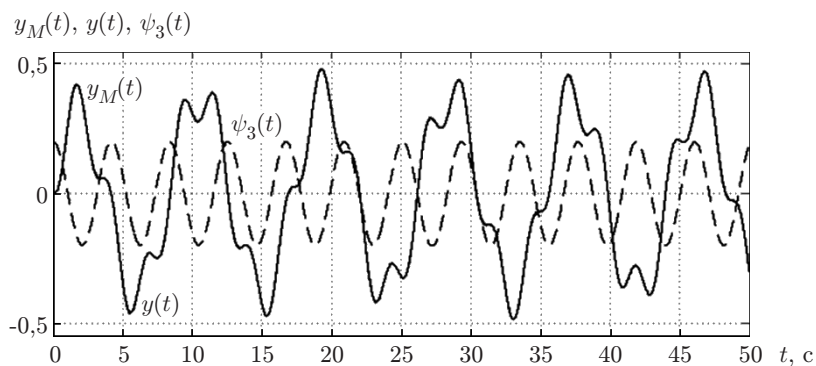


Рис. 2. Динамические характеристики системы

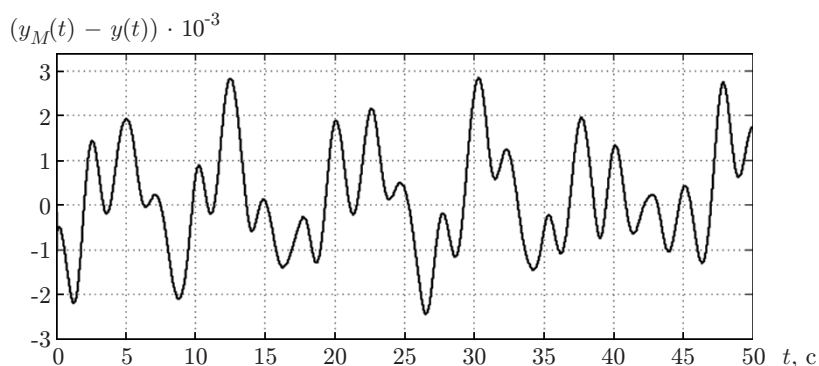


Рис. 3. Сигнал рассогласования выходов эталона (5), (6), (25) и объекта управления (22)

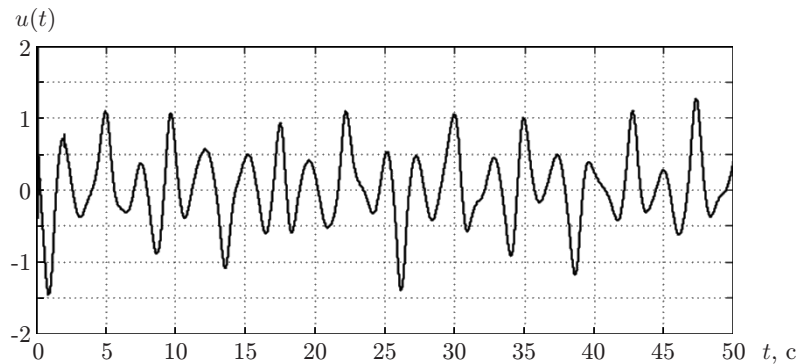


Рис. 4. Управляющее воздействие

Заключение. В данной работе рассмотрена задача управления нестационарным неаффинным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию в схеме с фильтром-корректором и явной эталонной моделью, имеющей основной и вспомогательный выходы. С помощью критерия гиперустойчивости и условий L -диссипативности предложен нелинейный робастный закон управления, обеспечивающий достижение требуемого качества системы в условиях априорной неопределённости и постоянного действия внешних возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3(116). С. 147–156.
2. Cho D., Kato Y., Spilman D. Sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems // IEEE Control Systems Magazine. 1993. 13. P. 42–48.
3. Young A., Chengyu C., Hovakimyan N., Lavretsky E. Control of a nonaffine double-pendulum system via dynamic inversion and time-scale separation // Proc. of American Control Conference. Minneapolis, USA, June 14–16, 2006. P. 1820–1825.
4. Ren B., Zhong Q.-C., Chen J. Robust control for a class of nonaffine nonlinear systems based on the uncertainty and disturbance estimator // IEEE Trans. Ind. Electron. 2015. 62, N 9. P. 5881–5888.
5. Li Z., Yang L. Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems // Proc. of the Intern. Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Xi'an, China, January 10–11, 2015. P. 623–627.
6. Wang H., Tian Y., Vasseur C. Non-affine nonlinear systems adaptive optimal trajectory tracking controller design and application // Studies in Informatics and Control. 2015. 24, N 1. P. 5–12.
7. Meng W., Yang Q., Si J., Sun Y. Adaptive neural control of a class of output-constrained nonaffine systems // IEEE Trans. Cyber. 2016. 46, N 1. P. 85–95.
8. Юркевич В. Д. Синтез нелинейных систем с ШИМ в канале управления на основе метода разделения движений // Докл. ТУСУР. 2012. № 1(25), Ч. 1. С. 217–230.
9. Еремин Е. Л. Робастное управление для одного класса неаффинных нелинейных SISO систем // Информатика и системы управления. 2015. № 3(45). С. 89–100.
10. Еремин Е. Л. Робастный регулятор для неаффинного по управлению нестационарного объекта // Информатика и системы управления. 2016. № 1(47). С. 106–116.

11. **Еремин Е. Л., Шеленок Е. А.** Адаптивно-периодическая следящая система для нелинейного объекта, аффинного по управлению // Автометрия. 2015. **51**, № 5. С. 113–119.
12. **Еремин Е. Л., Чепак Л. В.** Робастное управление аффинной системой в схеме с фильтр-корректором // Тр. XII Всеросс. совещ. по проблемам управления (электронный ресурс). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 950–959. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/procdngs/950.pdf> (дата обращения: 26.10.2016).
13. **Еремин Е. Л., Чепак Л. В.** Робастная система управления аффинным объектом в схеме с двумя эталонными моделями // Информатика и системы управления. 2014. № 3(41). С. 121–129.
14. **Eremin E. L., Shelenok E. A.** Adaptive-periodic control for nonlinear dynamic object with delays on state set of functioning // Proc. of the 2016 Intern. Siberian Conference on Control and Communications. IEEE, 2016. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7491710/> (дата обращения: 26.10.2016).
15. **Еремин Е. Л.** L -диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III // Информатика и системы управления. 2007. № 2(14). С. 153–164.
16. **Еремин Е. Л.** L -диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. 2013. № 2(36). С. 100–106.

Поступила в редакцию 26 октября 2016 г.
