



УДК 684.51

© 2021 г. Л.В. Никифорова, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО И ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ НЕАФФИННЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ НЕЙТРАЛЬНОГО ТИПА И ПО УПРАВЛЕНИЮ*

Рассматривается синтез регулятора для неаффинного по входу объекта с запаздываниями нейтрального типа и по управлению, переменные состояния которого недоступны прямому измерению. Построенный на основе критерия гиперустойчивости закон управления компенсирует в системе влияние запаздываний, помех, параметрическую и структурную неопределенности.

Ключевые слова: запаздывание нейтрального типа, запаздывание по управлению, неаффинный объект, критерий гиперустойчивости, фильтр-корректор.

DOI: 10.22250/isu.2021.70.110-121

Введение

Системы с запаздывающим аргументом используются при моделировании процессов во многих отраслях науки, – например, при моделировании дорожного трафика, экономических процессов, динамики популяций, иммунологических процессов в организме, распространения эпидемий, нелинейных оптических сред, материалов с памятью, динамики жидкостей, процессов в химических и ядерных реакторах, в линиях электропередачи, в двигателях сгорания и очень многих других процессов в биологии, медицине, механике, физике, технике [1, 2]. Поэтому задачи синтеза алгоритмов управления такими динамическими объектами актуальны, и их решению уделяется достаточно много внимания [3 – 11].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-08-00712).

Наиболее сложным вариантом среди объектов с запаздывающим аргументом является объект управления, обладающий всеми типами запаздываний: по состоянию, нейтрального типа и запаздыванием по управлению. Связано это в первую очередь с необходимостью компенсации отрицательного влияния различных запаздываний. Задача синтеза алгоритмов управления подобными объектами часто осложняется априорной параметрической и структурной неопределенностями исследуемого объекта, его нелинейностью или неафинностью, наличием внешних неконтролируемых возмущений, отсутствием датчиков для прямого измерения всех переменных состояния объекта.

В работе рассматривается процесс синтеза закона управления неафинным по входу объектом с запаздываниями нейтрального типа и по управлению, когда в процессе функционирования возможно изменение не только параметров объекта, но и его структуры, а измерению доступны только скалярные вход-выход объекта.

Математическая модель исследуемой системы

Рассмотрим неафинный по управлению объект с указанными типами запаздываний:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Dx(t - h_1) + C \frac{dx(t - h_2)}{dt} + B(u(t - h_3)F(u(t - h_3))) + f(t), \\ y(t) &= L^T x(t), \\ x(0) &= x_0, \quad x(\theta) = \phi(\theta), \quad \theta \in [-h_1, 0], \quad \frac{dx(\theta)}{d\theta} = \frac{d\mathcal{G}(\theta)}{d\theta}, \quad \mathcal{G} \in [-h_2, 0], \\ u(\theta) &= \nu(\theta), \quad \theta \in [-h_3, 0], \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; A – произвольная матрица состояния в форме Фробениуса размерности $n \times n$; D , C – матрицы размерности $n \times n$, все элементы которых нули, за исключением последних строк; $B = [0, \dots, 0, 1]^T$ – вектор размерности n ; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие, $h_i = \text{const} > 0$ – известные постоянные запаздывания, $i = 1, 2, 3$; $F(u(t - h_3))$ – скалярная нелинейная функция от запаздывающего управления; $f(t) \in R$ – внешняя неконтролируемая помеха, L – постоянный вектор размерности n , $y(t) \in R$ – измеряемый выход объекта; x_0 – начальные условия, $\phi(\theta)$, $\mathcal{G}(\theta)$, $\nu(\theta)$ – ограниченные непрерывные начальные функции.

В соответствии с [12] имеем тождество вида

$$\frac{dx(t - h_2)}{dt} = h_2^{-1}(x(t) - x(t - h_2)) + \psi(t), \tag{2}$$

если $\frac{dx(t-h_2)}{dt}$ удовлетворяет условию Липшица с постоянной k , $0 < h_2 \leq h_1$, $\|\underline{\psi}(t)\| \leq kh_2$, $\bar{\psi}(t) = C\underline{\psi}(t)$, то из ограниченности $\underline{\psi}(t)$ следует ограниченность $\bar{\psi}(t)$.

Если обозначить: $A_0 = A + h_2^{-1} C$, $C_0 = -h_2^{-1} C$, $\bar{f}(t) = f(t) + \bar{\psi}(t)$, то уравнение (1), получая вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_0 x(t) + Dx(t-h_1) + C_0 x(t-h_2) + B(u(t-h_3)F(u(t-h_3)) + \bar{f}(t)), \quad (3)$$

$$y(t) = L^T x(t),$$

в форме вход-выход можно переписать следующим образом:

$$a(p)y(t) = L(p) \cdot \tilde{u}(t) = L(p) \cdot (u(t-h_3)F(u(t-h_3)) + \bar{f}(t)), \quad (4)$$

где $p = d/dt$, $\tilde{u}(t)$ – нелинейное входное воздействие; $a(p)$ – произвольный нормированный квазиполином; $\deg a(p) = n$; $L(p)$ – гурвицев нормированный полином с положительным старшим коэффициентом; $\deg L(p) = m$.

Предположим, что функционирование объекта (1) происходит при следующих условиях:

1) неизвестные функции $F(u(t-h_3))$ и $f(t)$ удовлетворяют оценкам:

$$0 \leq F(u(t-h_3)) \leq \delta, \quad |f(t)| \leq f_0, \quad \forall t \geq 0, \quad (5)$$

где $\delta, f_0 = \text{const} > 0$ – неизвестные числа;

2) собственные значения матрицы C неизвестны, но принадлежат кругу единичного радиуса;

3) величины запаздываний h_1, h_2 и h_3 – известны;

4) значения $\max(n)$ и $\min(m)$ – известны, причем максимальный относительный порядок объекта (1) $\rho_{\max} = \max(n) - \min(m) = \max(n)$, когда $\min(m) = 0$;

5) коэффициенты матриц A, D, C и векторов B, L объекта управления (1) являются неизвестными числами, зависящими от набора неизвестных параметров ξ , принадлежащих известному ограниченному множеству Ξ ;

6) напрямую в объекте (1) измеряются только выход $y(t)$ и запаздывающее управление $u(t-h_3)$.

Учитывая, что максимальная относительная степень объекта (3) больше единицы, в основной контур системы управления последовательно к выходу объекта (3) подключим выходной фильтр-корректор

$$y_{out}(s) = W_{out}(s)y(s) = \frac{(Ts+1)^{\rho_{\max}-1}}{(T_*s+1)^{\rho_{\max}-1}} y(s), \quad (6)$$

где s – переменная Лапласа; $y_{out}(t)$ – выход фильтра; $T, T_* = \text{const} > 0$ – известные постоянные; T_* – достаточно мала [13 – 15].

Знаменатель передаточной функции $W_{out}(s)$ можно представить в виде $(T_*s + 1)^{\rho_{\max} - 1} = (T_*s + 1)^{\rho_{\max} - n + m} (T_*s + 1)^{n - m - 1}$.

Поскольку T_* задается достаточно малой, то $(T_*s + 1)^{n - m - 1} \cong 1$, тогда, учитывая (4), (6), можно представить:

$$\begin{aligned} y_{out}(t) &= \frac{L(p)}{a(p)} \cdot \frac{(Tp + 1)^{(\rho_{\max} - 1)}}{(T_*p + 1)^{(\rho_{\max} - 1)}} \tilde{u}(t) = \frac{\tilde{L}(p)}{\tilde{a}(p)} \cdot \frac{1}{(T_*p + 1)^{(n - m - 1)}} \tilde{u}(t) = \\ &= \tilde{W}(p) \cdot \frac{1}{(T_*p + 1)^{(n - m - 1)}} \tilde{u}(t) \cong \tilde{W}(p) \cdot \tilde{u}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\tilde{a}(p) = a(p) \cdot (Tp + 1)^{(\rho_{\max} - 1)}$; $\deg \tilde{a} = \rho_{\max} + m$; $\tilde{L}(p) = L(p)(Tp + 1)^{(\rho_{\max} - 1)}$; $\deg \tilde{L}(p) = \rho_{\max} + m - 1$; $\tilde{W}(p)$ – передаточные функции видоизмененного объекта, с единичной относительной степенью.

Для видоизмененного объекта управления (7) можно перейти в пространство состояний

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{D}\bar{x}(t - h_1) + \bar{C}\bar{x}(t - h_2) + \bar{B}(u(t - h_3)F(u(t - h_3)) + \bar{f}(t)), \quad (8)$$

$$y_{out}(t) = g^T \bar{x}(t),$$

где $\bar{x}(t) \in R^{\rho_{\max} + m}$ – переменные состояния; \bar{A} , \bar{D} , \bar{C} – постоянные матрицы размерности $(\rho_{\max} + m) \times (\rho_{\max} + m)$; $\bar{B} = [0, 0, \dots, 1]^T$ – вектор управления размерности $(\rho_{\max} + m)$; g^T – вектор выхода размерности $(\rho_{\max} + m)$.

Следуя работам [13, 16], требуемую динамику выхода основного контура сформируем с помощью задающего фильтр-корректора:

$$r_{in}(s) = W_{in}(s)r(s) = \frac{(Ts + 1)^{\rho_{\max} - 1}}{(T_*s + 1)^{\rho_{\max} - 1}} r(s), \quad (9)$$

где s – переменная Лапласа; $r(t)$ – скалярное задающее воздействие; $r_{in}(t)$ – выход задающего фильтр-корректора.

При этом традиционно для задания желаемой динамики объекта управления можно воспользоваться неявной эталонной моделью [13, 14, 16]

$$y_*(s) = \frac{1}{\chi_*^{-1}s + 1} \cdot r_{in}(s) = \frac{\chi_*}{s + \chi_*} \cdot r_{in}(s), \quad (10)$$

где s – переменная Лапласа; $y_*(t)$ – скалярный выход неявного эталона, который при $\chi_* \gg 1$ удовлетворяет соотношениям

$$y_*(t) \cong r_{in}(t), \quad (11)$$

$$y_*(t) = \frac{\chi_* \bar{B}(p)}{(p + \chi_*) \bar{B}(p)} r_{in}(t) \cong \frac{\chi_* \bar{B}(p)}{A(p) + \chi_* \bar{B}(p)} r_{in}(t) = \frac{\chi_* \bar{B}(p)}{A_*(p)} r_{in}(t) \quad (12)$$

или в пространстве состояний

$$\frac{dx_*(t)}{dt} = A_*x_*(t) + \bar{B}\chi_*r_{in}(t), \quad y_*(t) = g^T x_*(t), \quad x_*(0) = 0, \quad (13)$$

где $x_*(t) \in R^{\rho_{\max} + m}$ – переменные состояния эталона; A_* – постоянная матрица размерности $(\rho_{\max} + m) \times (\rho_{\max} + m)$; $\bar{B} = [0, 0, \dots, 1]^T$ – вектор управления размерности $(\rho_{\max} + m)$; g – вектор выхода размерности $(\rho_{\max} + m)$.

Пусть для объекта (8) и эталона (13) выполняются условия структурного согласования: $\bar{A} - A_* = \bar{B}\lambda_0 g^T$, $\bar{D} = \bar{B}d_0 g^T$, $\bar{C} = \bar{B}c_0 g^T$, где λ_0 , d_0 , c_0 – неизвестные постоянные.

Исследуемый объект управления (1) обладает запаздыванием по управлению, для компенсации которого нужно применять специальные устройства, – например, следуя [17 – 19], параллельно видоизмененному объекту (8) подключать упредитель-компенсатор

$$y_K(t) = \frac{\chi_*}{p + \chi_*} (u(t) - u(t - h_3)), \quad (14)$$

где $y_K(t)$ – выход упредитель-компенсатора; $p = d/dt$.

Выполним преобразования уравнения упредитель-компенсатора (14), аналогично (12), тогда уравнение (14) запишется в пространстве состояний следующим образом:

$$\frac{dx_K(t)}{dt} = A_*x_K(t) + \bar{B}\chi_*(u(t) - u(t - h_3)), \quad y_K(t) = g^T x_K(t), \quad x_K(0) = 0, \quad (15)$$

где $x_K(t) \in R^{\rho_{\max} + m}$ – переменные состояния упредитель-компенсатора.

Постановка задачи

Требуется при любых начальных условиях, при наличии в объекте (1), (2) запаздываний и внешних помех, обеспечить достижение основной цели управления – качественное слежение выхода объекта за задающим сигналом

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r(t)| \leq \sigma_0 = const, \quad (16)$$

где σ_0 – малая величина.

В условиях структурно-параметрической неопределенности достижение основной цели (16) будет гарантировано с учетом (11) достижения вспомогательной цели управления

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{out}(t) - y_*(t)| \cong \lim_{t \rightarrow \infty} |y_{out}(t) - r_{in}(t)| \leq \sigma_* = const, \quad (17)$$

где σ_* – малая величина.

Если в процессе синтеза алгоритма управления обеспечить выполнение вспомогательной цели управления (17), то в силу эквивалентности математических моделей выходного фильтр-корректора (6) и задающего (9) будет достижимо основное целевое условие (16).

Синтез закона управления

Разработка системы управления, функционирующей в условиях априорной параметрической и структурной неопределенностей, выходной сигнал которой с требуемым качеством отрабатывает некоторую желаемую динамику, состоит в нахождении явного вида закона управления.

В работе для решения поставленной задачи использовался критерий гиперустойчивости [20], согласно которому в рассмотрение вводится сигнал рассогласования $e(t) = x^*(t) - (\bar{x}(t) + x_K(t))$ и записывается эквивалентное математическое описание исследуемой системы (1), (2), (6), (9), (10), (14)

$$\frac{de(t)}{dt} = A_*e(t) + \bar{B}\chi_*\mu(t), \quad v(t) = g^T e(t) = y_*(t) - y_{out}(t) - y_K(t), \quad (18)$$

$$\mu(t) = -\left[u(t) - r_{in}(t) + \chi_*^{-1}\lambda_0 y_{out}(t) + \chi_*^{-1}d_0 y_{out}(t - h_1) + \right. \\ \left. + \chi_*^{-1}c_0 y_{out}(t - h_2) + (\chi_*^{-1}F(u(t - h_3)) - 1)u(t - h_3) + \chi_*^{-1}\bar{f}(t) \right]. \quad (19)$$

Для эквивалентной системы (18), (19) по критерию гиперустойчивости [20] должны быть выполнены два неравенства:

1) частотное для линейной стационарной части

$$\operatorname{Re}W_{ЛСЧ}(j\omega) > 0, \quad \forall \omega > 0, \quad (20)$$

где $W_{ЛСЧ}(s)$ – передаточная функция (18);

2) интегральное неравенство для нелинейной нестационарной части

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(\theta)v(\theta) d\theta > -\eta_0^2 = const, \quad \forall t > 0. \quad (21)$$

Неравенство (20) всегда выполняется для системы (18), поскольку, учитывая (10), ее передаточная функция имеет вид

$$W_{ЛСЧ}(s) = g^T (sE - A_*)^{-1} \bar{B} = \frac{\chi_*}{s + \chi_*}.$$

Покажем, что второе требование критерия гиперустойчивости тоже имеет место. Представим неравенство (21), с учетом (19), в виде:

$$\eta(0, t) = \int_0^t (u(\theta) - r_{in}(\theta))v(\theta) d\theta + \chi_*^{-1} \int_0^t y_{out}(\theta)v(\theta) d\theta + \\ + \chi_*^{-1}d_0 \int_0^t y_{out}(\theta - h_1)v(\theta) d\theta + \chi_*^{-1}c_0 \int_0^t y_{out}(\theta - h_2)v(\theta) d\theta + \\ + \int_0^t (\chi_*^{-1}F(u(\theta - h_3)) - 1)u(\theta - h_3)v(\theta) d\theta + \chi_*^{-1} \int_0^t \bar{f}(\theta)v(\theta) d\theta. \quad (22)$$

Явный вид закона управления находится из неравенства (21) при подстановке в него (22) и представления в виде суммы сигналов

$$u(t) = r_{in}(t) + \sum_{i=1}^5 u_i(t), \quad (23)$$

где $u_i(t)$ – составляющие управления, которые нужно определить.

Следуя [13, 17, 18], обеспечить выполнение неравенства (21), тем самым удовлетворив второе требование критерия гиперустойчивости, можно, задавая $u_i(t)$ в следующем виде:

$$u_1(t) = \gamma_1 y_{out}(t) \int_0^t y_{out}(\theta) v(\theta) d\theta + \gamma_2 (y_{out}(t))^2 v(t), \quad (24)$$

$$u_2(t) = \gamma_3 y_{out}(t - h_1) \int_0^t y_{out}(\theta - h_1) v(\theta) d\theta + \gamma_4 (y_{out}(t - h_1))^2 v(t), \quad (25)$$

$$u_3(t) = \gamma_5 y_{out}(t - h_2) \int_0^t y_{out}(\theta - h_2) v(\theta) d\theta + \gamma_6 (y_{out}(t - h_2))^2 v(t), \quad (26)$$

$$u_4(t) = \gamma_7 u(t - h_3) \int_0^t u(\theta - h_3) v(\theta) d\theta, \quad (27)$$

$$\gamma_7 = 2\tilde{\gamma}_7^2 \bar{\gamma}_7, \quad \tilde{\gamma}_7 = \max \left| \chi_*^{-1} F(u(t - h_3)) - 1 \right|, \quad \forall t > 0, \quad \bar{\gamma}_7 = const > 0,$$

$$u_5(t) = \gamma_8 \int_0^t v(\theta) d\theta + \gamma_9 v(t), \quad (28)$$

где $\gamma_i = const > 0$, $i = 1, \dots, 9$.

Подставляя (24) – (28) в уравнение (23), получим явный вид синтезированного закона управления

$$\begin{aligned} u(t) = & r_{in}(t) + \gamma_1 y_{out}(t) \int_0^t y_{out}(\theta) v(\theta) d\theta + \gamma_2 (y_{out}(t))^2 v(t) + \\ & + \gamma_3 y_{out}(t - h_1) \int_0^t y_{out}(\theta - h_1) v(\theta) d\theta + \gamma_4 (y_{out}(t - h_1))^2 v(t) + \\ & + \gamma_5 y_{out}(t - h_2) \int_0^t y_{out}(\theta - h_2) v(\theta) d\theta + \gamma_6 (y_{out}(t - h_2))^2 v(t) + \\ & + \gamma_7 u(t - h_3) \int_0^t u(\theta - h_3) v(\theta) d\theta + \gamma_8 \int_0^t v(\theta) d\theta + \gamma_9 v(t), \end{aligned} \quad (29)$$

где $\gamma_i = const > 0$, $i = 1, \dots, 9$ – параметры закона управления, значения которых подбираются в процессе имитационного моделирования.

Для системы (1), (2), (6), (9), (10), (14), (29) выполняется свойство L -диссипативности [21] за счет выбора малых параметров T^* в фильтрах (6) и (9), поэтому цель управления (17) выполняется. Поскольку выходной (6) и задающий (9) фильтр-корректоры имеют одинаковые передаточные функции, из выполнения цели управления (17) следует цель управления (16), т.е. система (1), (2), (6), (9), (10), (14), (29) будет L -диссипативна.

Наличие ненулевых начальных условий в объекте управления и использование выходного фильтр-корректора, который является форсирую-

щим звеном, могут привести к появлению на выходе этого звена существенных пиковых выбросов. Поэтому, аналогично работам [13, 15, 17, 21 – 24], выход фильтр-корректора (6) подключается к нелинейности типа «насыщение» с целью ослабить влияние пиков на формирование управляющего сигнала. Тогда закон управления (29) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & r_{in}(t) + \gamma_1 \text{sat}(y_{out}(t)) \int_0^t \text{sat}(y_{out}(\theta)) v(\theta) d\theta + \gamma_2 (\text{sat}(y_{out}(t)))^2 v(t) + \\
 & + \gamma_3 \text{sat}(y_{out}(t-h_1)) \int_0^t \text{sat}(y_{out}(\theta-h_1)) v(\theta) d\theta + \gamma_4 \text{sat}(y_{out}(t-h_1))^2 v(t) + \\
 & + \gamma_5 \text{sat}(y_{out}(t-h_2)) \int_0^t \text{sat}(y_{out}(\theta-h_2)) v(\theta) d\theta + \gamma_6 \text{sat}(y_{out}(t-h_2))^2 v(t) + \\
 & + \gamma_7 u(t-h_3) \int_0^t u(\theta-h_3) v(\theta) d\theta + \gamma_8 \int_0^t v(\theta) d\theta + \gamma_9 v(t),
 \end{aligned} \tag{30}$$

где $v(t) = r_{in}(t) - \text{sat}(y_{out}(t)) - y_K(t)$.

Пример работы системы управления

С целью иллюстрации качества работы синтезированной системы управления (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30) рассмотрим структурно и параметрически неопределенный объект, динамические процессы которого описываются следующими математическими моделями:

1) объект управления с относительным порядком $\rho = 2$,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -4 & -3 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.2 & -2 & -1.7 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & -0.3 & 0.1 \end{pmatrix},$$

$$F(u(t-h_3)) = \frac{2}{1 + \sqrt[4]{|u(t-h_3)|}} + 0.2 \sqrt[4]{|u(t-h_3)|}, \quad L^T = (2 \ 1 \ 0); \tag{31}$$

2) объект управления с относительным порядком $\rho = 1$,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0.5 & 5 & 2.5 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.2 & -2 & -1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.6 & 0.1 \end{pmatrix}, \tag{32}$$

$$F(u(t-h_3)) = \frac{2}{1 + \sqrt[4]{|u(t-h_3)|}} + 0.2 \sqrt[4]{|u(t-h_3)|}, \quad L^T = (2 \ 2 \ 0.5),$$

при $x_i(0) = 0.5$, $i = 1, 2, 3$; $h_1 = 2$ сек., $h_2 = 1$ сек., $h_3 = 1$ сек.; $f(t) = -0.15 \cos(0.1t)$.

Динамические модели выходного (6) и задающего (9) фильтр-корректоров задаются с учетом максимального относительного порядка рас-

смаатриваемых моделей (31), (32): $\rho_{max} = 2$.

$$y_{out}(t) = \frac{0.1p + 1}{0.0075p + 1} y(t), \quad r_{in}(t) = \frac{0.1p + 1}{0.0075p + 1} r(t). \quad (33)$$

Функционирование системы управления исследовалось при задающем воздействии: $r(t) = 0.2 + \sin(0.02t) \cdot \cos(0.04t)$.

В качестве параметра упредитель-компенсатора (14) выбирается $\chi^* = 10$.

В процессе имитационного моделирования проводилась серия вычислительных экспериментов, в ходе которых были найдены параметры закона управления (30), обеспечивающие приемлемое качество функционирования: $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 1000$, $\gamma_3 = 2000$, $\gamma_4 = 250$, $\gamma_5 = 1000$, $\gamma_6 = 400$, $\gamma_7 = 5$, $\gamma_8 = 2000$, $\gamma_9 = 1000$.

Результаты моделирования представлены на рис. 1, 2.

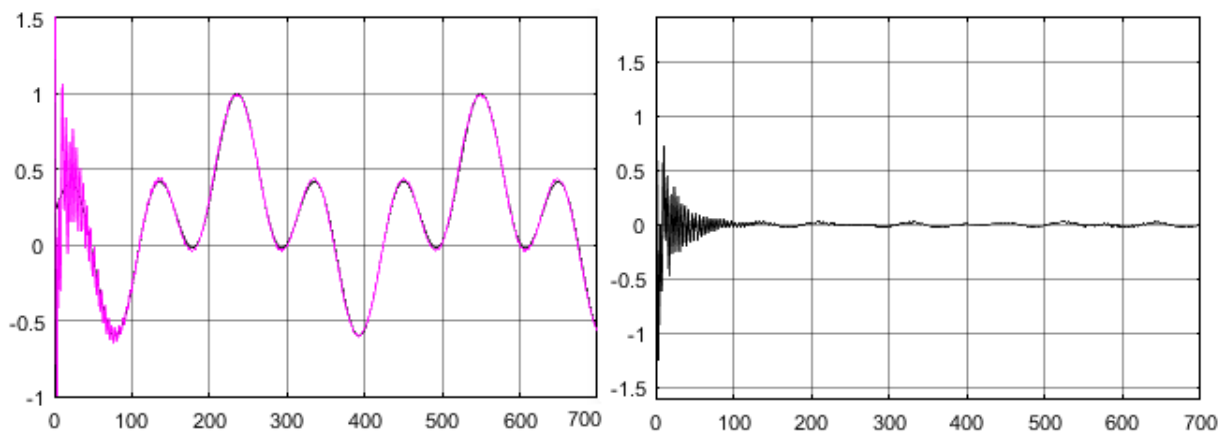


Рис. 1. Динамика задающего воздействия $r_{in}(t)$, выходного сигнала $y_{out}(t)$ (слева) и отклонения $r_{in}(t) - y_{out}(t)$ (справа) в системе управления (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30), (31), (33).

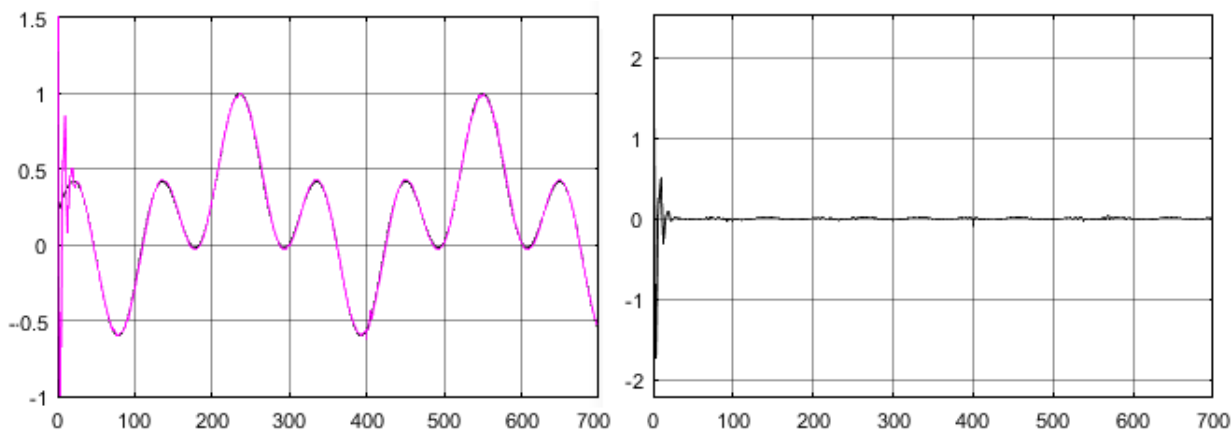


Рис. 2. Динамика задающего воздействия $r_{in}(t)$, выходного сигнала $y_{out}(t)$ (слева) и отклонения $r_{in}(t) - y_{out}(t)$ (справа) в системе управления (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30), (32), (33).

Графики переходных процессов в системах (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30), (31), (33) и (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30), (32), (33) демонстрируют, что поставленная цель управления (16) для структурно и параметрически неопределенного объекта с различными типами запаздываний достигается. Значение $\sigma_0 = 0,025$ – малая величина, что позволяет сделать вывод о хорошем качестве функционирования синтезированной системы управления (1), (2), (6), (9), (10), (14), (30).

Заключение

В статье рассматривается расширение подхода, предложенного в работах [13, 14], для класса объектов с запаздываниями нейтрального типа и по управлению. С помощью условий L -диссипативности, задающего и выходного фильтр-корректоров обоснована работоспособность синтезированной системы, когда измерению доступны только скалярные вход и выход объекта. Компенсация запаздывания по управлению осуществляется с использованием упредитель-компенсатора [17 – 19], а запаздывание нейтрального типа преобразуется в запаздывание по состоянию с помощью специального тождества (2). Имитационное моделирование позволяет найти неизвестные параметры разработанного алгоритма управления (30), для которых в процессе синтеза получены только нижние оценки. Результаты имитационного моделирования показывают, что разработанный регулятор и предложенные способы компенсации запаздываний обеспечивают в синтезированной системе достаточно хорошее качество функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kuang Y.* Delay differential equations with applications in population dynamics. Mathematics in science and engineering, 191. – Boston: Academic Press, Inc., 1993.
2. *Kolmanovskii V., Myshkis A.* Introduction to the theory and applications of functional differential equations. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
3. *Chen, F.* Stability Analysis and Controller Design for Quadratic Systems with Time Delay // Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020. – Hefei, 2020. – P. 4574-4579.
4. *Gomez M. A., Fridman L., Cruz-Ancona C. D.* Lyapunov redesign for a class of uncertain systems with delays // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. – 2021. – Vol. 43. – P. 101096.
5. *Kuzishchin, V. F., Merzlikina E. I., Hoang V. V.* The Fastest Response Algorithm for Thermal Plants with a Time Delay: Application in a Hybrid System Containing a PID Controller and an Automatic Tuning Unit // Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 66, No 8. – P. 550-559.
6. *Ortega-Martínez J., Mondié S., Santos-Sánchez O.* Lyapunov-Krasovskii prescribed derivative and the Bellman functional for time-delay systems // IFAC-PapersOnLine: 21st, Berlin,

- 12–17 июля 2020 года. – Berlin, 2020. – P. 7160-7165.
7. *Park J. H., Chong K. T., Kazantzis N., Patios A. G.* Time-Discretization of Non-Affine Nonlinear System with Delayed Input Using Taylor-Series // *KSME International Journal*. – 2004. – Vol. 18, N 8. – P. 1297–1305.
 8. *Shahbazzadeh M., Sadati S. J.* Delay-Dependent Stabilization of Time-Delay Systems with Nonlinear Perturbations // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. – 2021. – DOI 10.1007/s00034-021-01810-w.
 9. *Миркин, Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.* Адаптивное управления SISO-системами с запаздыванием в управлении и неизмеряемыми возмущениями // *Проблемы автоматки и управления*. – 2015. – № 2(29). – С. 11-21.
 10. *Цыкунов А. М., Фуртат, И. Б.* Синтез систем адаптивного управления объектами нейтрального типа с запаздыванием // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. – 2005. – № 1(24). – С. 7-13.
 11. *Цирлин, А. М. Овсепян В. С.* Робастная устойчивость и выбор настройки регуляторов для технологических объектов с запаздыванием // *Проблемы управления*. – 2018. – № 4. – С. 21-27.
 12. *Ретин Ю.М.* О приближенной замене системы с запаздыванием обыкновенными динамическими системами // *Прикладная математика и механика*. – 1965. – Т. 29, вып. 2. – С. 226 - 235.
 13. *Еремин Е. Л., Никифорова Л. В., Шеленок Е. А.* Система комбинированного нелинейного управления структурно-параметрически неопределенным неаффинным объектом с запаздыванием по состоянию и запаздыванием нейтрального типа // *Датчики и системы*. – 2021. – № 1(254). – С. 50-58.
 14. *Еремин Е. Л., Никифорова Л. В., Шеленок Е. А.* Комбинированный регулятор системы с неявным эталоном для управления по выходу структурно неопределенным неаффинным объектом с неизвестным запаздыванием по состоянию // *Информатика и системы управления*. – 2020. – № 4(66). – С. 118-128.
 15. *Eremin E. L., Nikiforova L. V., Shelenok E. A.* Combined Nonlinear Control Algorithm for Structural Undefined Non-Affine Input Delayed Plant // *Proceedings - 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Sochi, 05–11 сентября 2021 года*. – Sochi, 2021. – P. 6-11.
 16. *Еремин Е. Л., Никифорова Л. В., Шеленок Е. А.* Комбинированная нелинейная система управления с неявным эталоном для априорно неопределенного неаффинного двухканального объекта с запаздываниями по выходу // *Информатика и системы управления*. – 2020. – № 1(63). – С. 95-108.
 17. *Eremin E. L., Chepak L. V.* Combined controller for a nonaffine plant with delay in control // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2019. – Vol. 55, № 6. – P. 542-549.
 18. *Eremin E. L., Nikiforova L. V., Shelenok E. A.* Combined Control System for Structural and Parametric Uncertain Non-Affine Plants with Delay in Control // *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года*. – Vladivostok, 2020. – P. 9271642.
 19. Пат. 2012345 РФ. Следящая система управления для априорно-неопределенных объектов с запаздыванием по управлению / Е.Л. Еремин, Л.В. Чепак // *Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели»*. – 2012. – № 12.

20. *Еремин Е. Л., Цыкунов А. М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992.
21. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2(36). – С.100-106.
22. *Еремин Е.Л.* Робастный регулятор для неаффинного по управлению нестационарного объекта // Информатика и системы управления. – 2016. – № 1(47). – С. 101-116.
23. *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. 100-110.
24. *Халил Х.К.* Нелинейные системы / пер. с англ. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009.

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

E-mail:

Никифорова Лариса Владимировна – cherak@inbox.ru.