

УДК 684.511

КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ НЕАФФИННОГО ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ

© Е. Л. Ерёмин, Л. В. Чепак

*Амурский государственный университет,
675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21
E-mail: ereminel@mail.ru
chepak@inbox.ru*

Предлагается решение задачи синтеза комбинированной системы управления по выходу для нелинейного неаффинного объекта с запаздыванием в канале управления, функционирующего в условиях априорной параметрической неопределённости и под влиянием внешних помех. Приведённые результаты имитационного моделирования подтверждают работоспособность синтезированной системы управления, а полученный регулятор обеспечивает слежение выхода объекта за эталонным сигналом.

Ключевые слова: запаздывание по управлению, неаффинная система, критерий гиперустойчивости, стационарный наблюдатель, априорная неопределённость.

DOI: 10.15372/AUT20190602

Введение. На протяжении нескольких десятилетий в теории автоматического управления одной из актуальных задач остаётся построение эффективных систем управления для динамических априорно неопределённых объектов, в модели которых присутствует запаздывание во входном сигнале. Это объясняется тем, что большинство производственных процессов обладает запаздываниями, которыми нельзя пренебречь. Запаздывание неизбежно появляется при управлении удалёнными объектами. Конструктивные особенности некоторых автоматических систем управления влекут за собой транспортное запаздывание. Запаздывание может быть вызвано сложными вычислительными устройствами, контроллерами, требующими временных затрат на расчёт управляющего воздействия. Чаще всего влияние запаздывания на систему в целом так велико, что неучёт его воздействия приводит, как правило, к возникновению автоколебаний в замкнутой системе или к потере устойчивости системы управления.

Синтез алгоритмов управления для динамических объектов с запаздыванием требует учёта его влияния на устойчивость и качество функционирования систем. Поэтому предлагаются различные способы компенсации запаздывания по управлению. В случае известных параметров объекта — это предикторы Смита [1] и Ресвика [2] для непрерывных систем и регулятор Цыпкина для дискретных [3]. Для априорно неопределённых динамических объектов в [4, 5] были предложены прогнозирующее устройство и вспомогательная модель, формирующие упреждающий сигнал. В [1–5] разработаны адаптивные системы для линейных объектов с запаздыванием по управлению, однако вопросам построения систем для нелинейных неаффинных объектов (т. е. нелинейных систем, являющихся нелинейными по управлению) [6, 7] с запаздыванием по управлению не уделено достаточного внимания. В данной работе для компенсации негативного влияния известного постоянного входного запаздывания на функционирование неаффинного объекта используется подход с упредителем-компенсатором, предложенный в [8–11] и развитый в [12–14].

Часто на практике измерению в режиме реального времени недоступны либо все переменные состояния объекта управления, либо какая-то их часть в силу технических или

экономических ограничений. В связи с этим требуется строить систему управления с обратной связью по выходу. Одним из подходов, позволяющих получить асимптотическую оценку неизмеряемых переменных состояния, является применение наблюдателей, в том числе наблюдателей с сильной обратной связью [15].

В данной работе построение закона управления для неаффинного объекта основано на принципе разделения [16] и состоит из двух этапов. Во-первых, с использованием критерия гиперустойчивости синтезируется комбинированный закон управления с обратной связью по состоянию, обеспечивающий требуемое качество переходных процессов в нелинейной системе. Во-вторых, в синтезированном законе управления осуществляется замена переменных состояния на соответствующие оценки, полученные с использованием наблюдателя с сильной обратной связью [6].

Описание исходной системы управления. Динамика нелинейного неаффинного объекта с запаздыванием по управлению задаётся следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} = & (A + B_0 a^\top(y(t)))x(t) + B(y(t))(u(t-h)f_1(x(t), u(t-h)) + \\ & + f_2(x(t), u(t-h))) + \varphi(t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad u(\theta) = v(\theta), \quad \theta \in [-h, 0], \quad y(t) = x_1(t),$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $u(t), y(t) \in \mathbb{R}$ — управление и выход; h — известное постоянное запаздывание; A — нильпотентная матрица; $B_0 = [0, \dots, 0, 1]^\top$; $B(y(t)) = [0, \dots, 0, b_n(y(t))]^\top$, $a(y(t)) = [a_1(y(t)), a_2(y(t)), \dots, a_n(y(t))]^\top$ — нелинейные векторные функции, для элементов которых выполняются ограничения

$$|a_1(y(t))| \leq a_1^+, \dots, |a_n(y(t))| \leq a_n^+, \quad b_n^- \leq b_n(y(t)) \leq b_n^+, \quad (2)$$

где $a_i^+, b_n^-, b_n^+ > 0$ — известные числа, $i = \overline{1, n}$; $\varphi(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор внешних неконтролируемых помех, $\varphi(t) = [0, \dots, 0, \varphi_n(t)]^\top$, элемент которого удовлетворяет неравенству

$$|\varphi_n(t)| \leq \varepsilon_1, \quad \forall t \geq 0, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1 = \text{const} > 0$ — известное число; $f_1(x(t), u(t-h)), f_2(x(t), u(t-h))$ — неизвестные гладкие нелинейные функции, удовлетворяющие неравенствам

$$\varepsilon_2 < f_1(x(t), u(t-h)) \leq \varepsilon_3; \quad |f_2(x(t), u(t-h))| \leq \varepsilon_4, \quad (4)$$

где $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 = \text{const} > 0$ — известные числа; x_0 — начальные условия; $v(\theta)$ — ограниченная непрерывная начальная функция.

Требуемое поведение объекта управления (1) задаётся динамическим звеном, подключаемым параллельно объекту управления (1) — явной эталонной моделью. Причём рассматриваются два выхода эталона [17]: основной — задающий желаемую динамику объекта, и вспомогательный — формирующий динамику основного контура управления:

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + B_m r(t); \quad y_m(t) = x_{m1}(t); \quad z_m(t) = g^\top x_m(t), \quad (5)$$

где $x_m(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния эталонной модели; $r(t) \in \mathbb{R}$ — задающее воздействие; $y_m(t) \in \mathbb{R}$ — основной выход модели; $z_m(t) \in \mathbb{R}$ — вспомогательный выход модели;

$A_m = A - B_0 a_m^\top$ — гурвицева матрица; $a_m = [a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn}]^\top$, $B_m = [0, \dots, 0, b_m]^\top$ — постоянные векторы, $b_m > 0$; g — вектор, элементы которого выбираются специальным образом, как показано далее.

Негативной особенностью нелинейного объекта (1) является запаздывание по управлению, которое отрицательно сказывается на работоспособности всей системы. Чтобы уменьшить или ослабить влияние запаздывания на работу системы управления в целом, применяется упредитель-компенсатор, подключаемый параллельно объекту (1) [12–14]. Аналогично эталону будем рассматривать два выхода упредителя-компенсатора:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = A_m x_k(t) + B_m(u(t) - u(t - h)); \quad y_k(t) = x_{k1}(t); \quad z_k(t) = g^\top x_k(t), \quad (6)$$

где $x_k(t) \in \mathbb{R}^n$; $y_k(t)$, $z_k(t)$ — основной и вспомогательный выходы соответственно.

Постановка задачи. Требуется для нелинейного неаффинного объекта управления (1)–(4) синтезировать комбинированный закон управления

$$u(t) = u(x(t), x_m(t), x_k(t), u(t - h), r(t)) \quad (7)$$

таким образом, чтобы при любых начальных условиях и любом уровне априорной неопределённости системы (1)–(7) было обеспечено выполнение целевого неравенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_m(t) - y(t)| \leq \sigma_0 = \text{const} > 0. \quad (8)$$

Синтез закона управления. На первом этапе решения поставленной в работе задачи выполняется синтез комбинированного закона управления для системы с нелинейным неаффинным объектом на основе критерия гиперустойчивости в предположении, что измерению доступны все переменные состояния объекта. Затем в целях получения и использования в синтезированном регуляторе оценок неизмеряемых переменных состояния объекта (1) в основной контур управления вводится наблюдатель с сильной обратной связью.

Следуя методике критерия гиперустойчивости, рассматривается сигнал рассогласования $e(t) = x_m(t) - (x(t) + x_k(t))$ и для исследуемой системы (1)–(7) эквивалентное математическое описание запишется в виде линейной стационарной части

$$\frac{de(t)}{dt} = A_m e(t) + B_m \mu(t); \quad \nu(t) = z_m(t) - g^\top x(t) - z_k(t), \quad (9)$$

и нелинейной нестационарной части

$$\begin{aligned} \mu(t) = -[u(t) - r(t) + b_m^{-1}((a_m + a(y(t)))^\top x(t) + b_n(y(t))((f_1(x(t), u(t - h)) - 1)u(t - h) + \\ + f_2(x(t), u(t - h))) + \varphi_n(t))], \end{aligned} \quad (10)$$

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

На втором этапе критерия гиперустойчивости обеспечивается выполнение интегрального неравенства В. М. Попова

$$\eta(0, t) = - \int_0^t \mu(\tau) \nu(\tau) d\tau \geq -\eta_0^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0, \quad (11)$$

с представлением его интегральной части с учётом $\mu(t)$ из (10) следующим образом:

$$\eta(0, t) = \int_0^t (u(\tau) - r(\tau)) \nu(\tau) d\tau + \frac{1}{b_m} \int_0^t (a_m + a(y(\tau)))^\top x(\tau) \nu(\tau) d\tau +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{b_m} \int_0^t (b_n(y(\tau))f_1(x(\tau), u(\tau - h)) - 1)u(\tau - h)\nu(\tau) d\tau + \\
& + \frac{1}{b_m} \int_0^t (b_n(y(\tau))f_2(x(\tau), u(\tau - h)) + \varphi_n(\tau))\nu(\tau) d\tau. \tag{12}
\end{aligned}$$

Формируя структуры закона управления (7) из выражения (12), сигнал разности $(u(t) - r(t))$ целесообразно описать суммой трёх сигналов $(u_1(t) + u_2(t) + u_3(t))$, тогда

$$u(t) = r(t) + u_1(t) + u_2(t) + u_3(t), \tag{13}$$

где $u_1(t)$, $u_2(t)$ и $u_3(t)$ — соответствующие слагаемые управления $u(t)$ вида

$$u_1(t) = \sum_{i=1}^n \left(h_i x_i(t) \int_0^t x_i(\tau)\nu(\tau) d\tau + h_{1i} x_i^2(\tau)\nu(\tau) \right), \quad h_i, h_{1i} = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \tag{14}$$

$$u_2(t) = \tilde{h}_2 u(t - h) \int_0^t u(\tau - h)\nu(\tau) d\tau, \tag{15}$$

$$\tilde{h}_2 = 2\hat{h}_1^2 \hat{h}_2, \quad \hat{h}_1 = \max |b_m^{-1} b_n^+ f_1(x(t), u(t - h)) - 1|, \quad \forall t > 0, \quad \hat{h}_2 = \text{const} > 0,$$

$$u_3(t) = \tilde{h}_3 \int_0^t \nu(\tau) d\tau + \tilde{h}_4 \nu(t), \quad \tilde{h}_3 = 2\hat{h}_3 (b_n^+)^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_4)^2, \quad \hat{h}_3, \tilde{h}_4 = \text{const} > 0. \tag{16}$$

Аналогично [7] можно показать, что для (12) выполняется интегральное неравенство (11).

Таким образом, синтезированный закон управления, общий вид которого задавался уравнением (7) с учётом соотношений (14)–(16), будет описываться уравнением

$$\begin{aligned}
u(t) = r(t) + \sum_{i=1}^n \left(h_i x_i(t) \int_0^t x_i(\tau)(z_m(\tau) - g^\top x(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + h_{1i} x_i^2(t)\nu(t) \right) + \\
+ \tilde{h}_2 u(t - h) \int_0^t u(\tau - h)(z_m(\tau) - g^\top x(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + \\
+ \tilde{h}_3 \int_0^t (z_m(\tau) - g^\top x(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + \tilde{h}_4 (z_m(t) - g^\top x(t) - z_k(t)). \tag{17}
\end{aligned}$$

На третьем этапе критерия гиперустойчивости необходимо обеспечить выполнение неравенства для линейной стационарной части эквивалентной системы (9):

$$\operatorname{Re} W(j\omega) > 0, \quad \forall \omega > 0. \quad (18)$$

Если обобщённый выход эквивалентной системы (9) записать как рассогласование в основном контуре исследуемой системы $\nu(t) = z_m(t) - g^\top x(t) - z_k(t) = g^\top (x_m(t) - x(t) - x_k(t))$, то передаточная функция линейной стационарной (9) части будет иметь следующий вид:

$$W(s) = g^\top (sE_n - A_m)^{-1} B_m = b_m g(s) / a_m(s),$$

где $a_m(s)$ — гурвицев полином степени n ; $g(s)$ — полином степени $n - 1$, коэффициенты которого выбираются разработчиками системы таким образом, чтобы выполнялось неравенство (18). Заметим, что наиболее простой вариант данного выбора состоит в том, чтобы корни полинома $g(s)$ совпадали с $(n - 1)$ -м корнем полинома $a_m(s)$, а желаемая динамика основного контура соответствовала динамике инерционного звена первого порядка, для которого выполнение неравенства (18) очевидно:

$$\operatorname{Re} (b_m / (j\omega + a_0)) = b_m / (\omega^2 + a_0^2) > 0, \quad \forall \omega > 0, \quad (19)$$

поскольку $b_m > 0$, $a_0 > 0$, так как $-a_0 < 0$ — какой-либо корень гурвицева полинома $a_m(s)$, не совпадающий ни с одним корнем полинома $g(s)$.

В силу выполнения неравенств (11) и (19) на основе критерия гиперустойчивости можно утверждать, что система управления (1), (5), (6), (17) является гиперустойчивой в заданном классе неопределённости (2)–(4), т. е. выполняется предельное условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\nu(t)| = 0 \quad (20)$$

и, как показано в работе [12], достигается цель управления (8).

Техническая реализация комбинированного регулятора. Синтез закона управления (17) осуществлялся в предположении измеримости переменных состояния объекта (1). Однако при решении практических задач чаще всего измерению доступен только выход объекта $y(t)$. Поэтому для технической реализуемости синтезированного закона (17) нужны оценки недоступных прямым измерениям переменных состояния объекта (1), которые можно получить с использованием, например, наблюдателя с сильной обратной связью. Подключая параллельно к нелинейному объекту (1) линейные эталонную модель (5) и упредитель-компенсатор (6), получаем эквивалентное математическое описание исследуемой системы управления в виде нелинейной системы первого типа, где линейная стационарная часть без запаздывания описывается уравнением (9), а нелинейная нестационарная, включающая в себя все нелинейности объекта управления, — уравнением (10). Принимая во внимание обоснованное использование наблюдателей для линейных объектов с запаздыванием по управлению [13] и для аффинных нелинейных объектов [7], при решении данной задачи можно также использовать быстродействующий стационарный линейный наблюдатель, поскольку в эквивалентном математическом описании исследуемой системы её нелинейная нестационарная часть учитывает неаффинность объекта по управлению, при этом её линейная стационарная часть имеет вид, аналогичный линейным стационарным частям в [13] и [18]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_n}{dt} &= A_m x_n + N(y(t) - C^\top x_n(t)) + B_m u(t-h); \\ y_n(t) &= C^\top x_n(t); \quad \nu_n(t) = \bar{g}^\top x_n(t), \end{aligned} \quad (21)$$

где $x_n(t) \in \mathbb{R}^n$ — переменные состояния наблюдателя; $y_n(t) \in \mathbb{R}$ — выход наблюдателя; $\nu_n(t) \in \mathbb{R}$ — обобщенный выход наблюдателя; N — постоянный вектор, обеспечивающий заданную динамику оценки состояния системы; $C^\top = [0, \dots, 0, 1]$.

Параметры вектора \bar{g} задаются, следуя [13], в виде $\bar{g} = gK^{-1}$, K — коэффициент согласования в установившемся режиме обобщенных выходов эталона (5) и наблюдателя (21):

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} g^\top (sE - A_m)^{-1} N = -g^\top A_m^{-1} N.$$

Компоненты вектора N наблюдателя (21) выбираются так, чтобы матрица $(A_m - NC^\top)$ была гурвицевой. Поскольку пара (A_m, C) наблюдаема, такой выбор вполне возможен.

Выбор значений вектора N осуществляется из условия желаемого распределения корней характеристического полинома наблюдателя (21), которые удовлетворяют неравенству

$$\min_j \operatorname{Re}(-\lambda_j) \geq \theta \max_i \operatorname{Re}(-\lambda_i), \quad (22)$$

где λ_i, λ_j — характеристические числа матриц A_m и $(A_m - NC^\top)$ соответственно; $\theta = \text{const}$ — скаляр, определяющий желаемое расположение полюсов на комплексной плоскости при $\theta \gg 1$.

Таким образом, если в комбинированном законе управления (17) переменные состояния $x(t)$ объекта управления (1) заменить их соответствующими оценками $x_n(t)$, то

$$\begin{aligned} u(t) &= r(t) + \sum_{i=1}^n \left(h_i x_{ni}(t) \int_0^t x_{ni}(\tau) (z_m(\tau) - g^\top x_n(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + h_{1i} x_{ni}^2(t) \nu(t) \right) + \\ &\quad + \tilde{h}_2 u(t-h) \int_0^t u(\tau-h) (z_m(\tau) - g^\top x_n(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + \\ &\quad + \tilde{h}_3 \int_0^t (z_m(\tau) - g^\top x_n(\tau) - z_k(\tau)) d\tau + \tilde{h}_4 (z_m(t) - g^\top x_n(t) - z_k(t)), \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$h_i, h_{1i} = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad \tilde{h}_2 = 2\hat{h}_1^2 \hat{h}_2, \quad \hat{h}_1 = \max |b_m^{-1} b_n^+ f_1(x(t), u(t-h) - 1)|, \quad \forall t > 0,$$

$$\hat{h}_2 = \text{const} > 0, \quad \tilde{h}_3 = 2\hat{h}_3 (b_n^+)^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_4)^2, \quad \hat{h}_3, \tilde{h}_4 = \text{const} > 0,$$

и система (1), (5), (6), (23) будет L -диссипативной в заданном классе, а регулятор, синтезированный на основе критерия гиперустойчивости, окажется технически реализуемым.

Как отмечалось в [16], одним из недостатков наблюдателей с сильной обратной связью (21), (22) является появление в переходных процессах пиков при увеличении значения θ , что приводит к неустойчивости системы. Поэтому, чтобы ослабить влияние пиков на поведение объекта управления, в законе управления используют насыщение, включающееся при выходе переменных состояния наблюдателя из некоторого компактного множества:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & r(t) + \sum_{i=1}^n h_i \text{sat}(x_{ni}(t)) \int_0^t \text{sat}(x_{ni}(\tau))(z_m(\tau) - g^\top \text{sat}(x_n(\tau)) - z_k(\tau)) d\tau + \\
 & + \sum_{i=1}^n h_{1i} (\text{sat}(x_{ni}(t)))^2 \nu(t) + \tilde{h}_2 u(t-h) \int_0^t u(\tau-h)(z_m(\tau) - g^\top \text{sat}(x_n(\tau)) - z_k(\tau)) d\tau + \\
 & + \tilde{h}_3 \int_0^t (z_m(\tau) - g^\top \text{sat}(x_n(\tau)) - z_k(\tau)) d\tau + \tilde{h}_4 (z_m(\tau) - g^\top \text{sat}(x_n(t)) - z_k(t)). \quad (24)
 \end{aligned}$$

Имитационное моделирование. В представленной работе синтез комбинированного регулятора в неаффиной системе основан на использовании критерия гиперустойчивости, согласно которому для обеспечения выполнения интегрального неравенства (11) все введённые коэффициенты составляющих регулятора (14)–(16) должны иметь положительные значения. Это гарантирует в силу выполнения данного критерия работоспособность рассматриваемой системы, но качество функционирования системы может оказаться неудовлетворительным. Причина связана с тем, что при синтезе систем управления на основе критерия гиперустойчивости отсутствуют аналитические процедуры выбора значений коэффициентов регулятора, обеспечивающих желаемое качество. Указанный недостаток эффективно устраняется экспериментальным подбором искомых значений на этапе имитационного моделирования системы, обеспечивая высокое качество динамических процессов.

Проиллюстрируем полученные результаты на примере модели неаффиного объекта (1) при $n = 3$ со следующими нелинейностями, удовлетворяющими ограничению (2), которые соответствуют заданному классу рассматриваемых объектов управления:

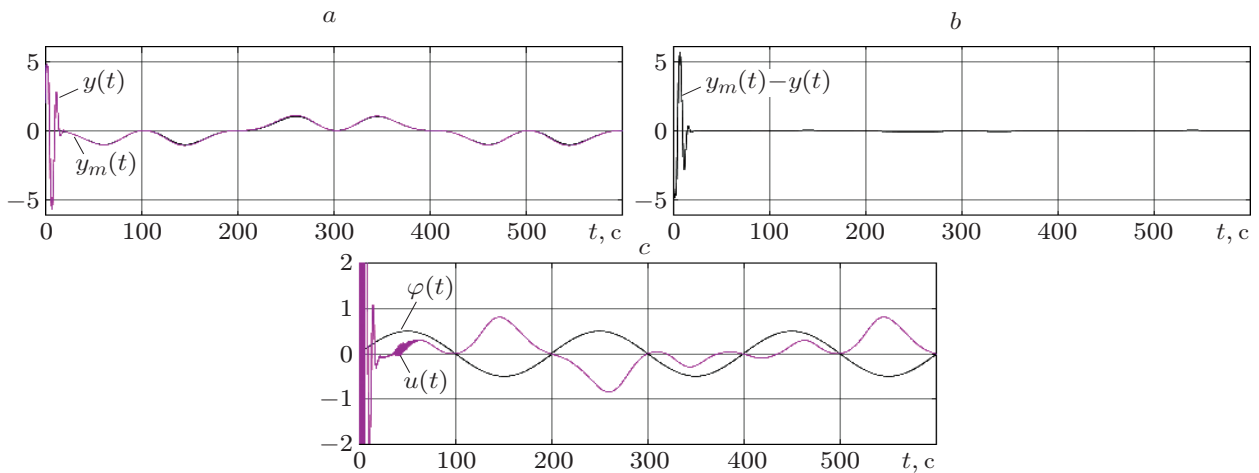
$$B(y(t)) = [0, \dots, 0, b_{31} + b_{32} \sin(x_3(t))]^\top, \quad (25)$$

$$a(y(t)) = [a_{11} + a_{12} |\sin(x_1(t))|, a_{21} + a_{22} |\cos(x_2(t))|, a_{31} + a_{32} |\sin(x_3(t))|]^\top, \quad (26)$$

$y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 2$, внешнему возмущению $\varphi(t) = \varphi_0 \sin(0,01\pi t)$ и нелинейностям

$$f_1(x(t), u(t)) = 0,1 + d_0 / (1 + \sqrt[4]{|u(t)|}); \quad f_2(x(t), u(t)) = 0,2 \tanh |0,15u(t-h)|. \quad (27)$$

Поскольку исследуемый объект управления (1) является неустойчивым, то на временном интервале $0 \leq t \leq h$ неустойчивый объект с запаздыванием по управлению оказывается неуправляемым, так как в первоначальные моменты времени при $t \leq h$ функция $u(t) = 0$. Поэтому ограниченность величины запаздывания при управлении неустойчивым объектом является необходимым условием построения работоспособной системы управления. В ходе имитационного моделирования величина запаздывания $h = 0,7$ с.



Результаты имитационного моделирования: *a* — выход объекта управления $y(t)$ и выход эталонной модели $y_m(t)$; *b* — сигнал ошибки $y_m(t) - y(t)$; *c* — управляющий сигнал $u(t)$ и внешнее возмущение $\varphi(t)$

Параметры (25)–(27) и внешнего возмущения $\varphi(t)$ удовлетворяют следующим ограничениям:

$$-1 \leq a_{11} \leq 1, \quad -0,1 \leq a_{12} \leq 0,1, \quad -1 \leq a_{21} \leq 1, \quad -0,2 \leq a_{22} \leq 0,2, \quad -4 \leq a_{31} \leq -2,$$

$$-0,6 \leq a_{32} \leq 0,6, \quad 1 \leq b_{31} \leq 1,8, \quad -0,8 \leq b_{32} \leq 0,8, \quad 0,2 \leq d_0 \leq 2,2, \quad 0 < \varphi_0 \leq 0,15.$$

Задающее воздействие $r(t) = -1,4 \sin(0,005\pi t) \cdot \sin^2(0,01\pi t) \cdot \cos(0,5 \sin(0,015\pi t))$.

Эталонная модель (5) и упредитель-компенсатор (6) заданы параметрами

$$A_m = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & -3 \end{pmatrix}; \quad B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Учитывая вышеизложенные требования к g и эталон (28), можно задать $g^\top = [1, 2, 1]$.

Исходя из заданных значений эталонной модели (28), выбранного значения $\theta = 40$, удовлетворяющего неравенству (22), рассчитаны параметры наблюдателя (21): $K = 1,0789$, $N = [117, 4446, 50310]^\top$, $\bar{g}^\top = [0,9269, 1,8537, 0,9269]$. В ходе проведения вычислительных экспериментов для исследуемой системы (1), (5), (6), (24)–(28) были подобраны значения коэффициентов комбинированного закона управления (24):

$$h_1 = 300; \quad h_{11} = 30; \quad h_2 = 80; \quad h_{12} = 10; \quad h_3 = 20; \quad h_{13} = 3;$$

$$\tilde{h}_2 = 10; \quad \tilde{h}_3 = 200; \quad \tilde{h}_4 = 90. \quad (29)$$

На рисунке представлены динамические процессы в системе (1), (5), (6), (24)–(29). Моделирование проводилось при следующих исходных данных объекта: $a_{11} = -1$; $a_{12} = 0,1$; $a_{21} = 1$; $a_{22} = -0,2$; $a_{31} = -4$; $a_{32} = -0,6$; $b_{31} = 1,8$; $b_{32} = -0,8$; $d_0 = 2$; $\varphi_0 = 0,5$.

Анализ результатов имитационного моделирования подтверждает работоспособность синтезированной системы управления и показывает, что рассогласование между выходом нелинейного объекта и основным выходом эталона $|y_m(t) - y(t)| \leq \sigma_0 = 0,07$, т. е. комбинированная система обладает достаточно хорошим качеством функционирования.

Заключение. В данной работе предложена структура комбинированного регулятора для управления нелинейным неаффинным объектом по выходу при наличии входного запаздывания и внешних возмущений. Синтез регулятора опирается на критерий гиперустойчивости, для оценки неизмеряемых переменных состояния используется стационарный наблюдатель с сильной обратной связью, для учёта влияния запаздывания — упредитель-компенсатор. Предлагаемая схема управления позволяет скомпенсировать в объекте нелинейности, неопределённости, воздействие внешних помех и запаздывающее управление. В силу выполнения целевого условия (8) разработанный комбинированный регулятор обладает робастными свойствами, т. е. компенсация осуществляется частично, но с достаточной точностью. Имитационное моделирование показало хорошее качество слежения выхода объекта за основным выходом явной эталонной модели и подтвердило теоретические результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Smith J. M.** Closer control of loops with dead time // Chem. Eng. Progress. 1957. **53**, N 5. P. 217–219.
2. **Гурецкий Х.** Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
3. **Цыпкин Я. З.** Оптимальные адаптивные системы управления объектами с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 1986. № 8. С. 5–24.
4. **Паршева Е. А., Цыкунов А. М.** Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярными входами-выходами // Автоматика и телемеханика. 2001. № 1. С. 142–149.
5. **Миркин Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.** Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью для объектов с запаздыванием в управлении // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 159–171.
6. **Халил Х. К.** Нелинейные системы. М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009. 832 с.
7. **Чепак Л. В.** Робастное управление аффинной системой по выходной переменной // Информатика и системы управления. 2013. **38**, № 4. С. 139–148.
8. **Еремин Е. Л.** Гиперустойчивость системы управления нелинейным объектом с запаздыванием // Сб. науч. тр. «Автоматизация технологических процессов». Фрунзе: Фрунзенск. политех. ин-т, 1987. С. 86–95.
9. **Пат. RUS 2246123.** Самонастраивающаяся система управления для объектов нейтрального типа с запаздыванием по управлению /Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак. Оpubл. 10.02.2005, Бюл. № 4.
10. **Пат. RUS 2427869.** Самонастраивающаяся система управления для объектов с запаздыванием по управлению /Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак. Оpubл. 27.08.2011, Бюл. № 24.
11. **Пат. RUS 2449337.** Следящая система управления для априорно-неопределённых объектов с запаздыванием по управлению /Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак. Оpubл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
12. **Еремин Е. Л., Ильина (Чепак) Л. В.** Адаптивные системы с динамическим упредитель-компенсатором для объектов с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. 2002. **3**, № 1. С. 97–102.
13. **Еремин Е. Л., Чепак Л. В.** Адаптивная система с явно-неявным эталоном и стационарным наблюдателем для объекта с запаздыванием по управлению // Вестник ТОГУ. 2011. **21**, № 2. С. 13–22.

14. **Еремин Е. Л., Чепак Л. В.** Робастная система управления с фильтром-корректором для объекта с запаздыванием // Информатика и системы управления. 2014. **40**, № 2. С. 138–146.
15. **Голубев А. Е., Крищенко А. П., Ткачев С. Б.** Стабилизация нелинейных динамических систем с использованием оценки состояния системы асимптотическим наблюдателем // Автоматика и телемеханика. 2005. № 7. С. 3–40.
16. **Голубев А. Е., Крищенко А. П., Ткачев С. Б.** Принцип разделения для аффинных систем // Дифференциальные уравнения. 2001. **37**, № 11. С. 1468–1475.
17. **Еремин Е. Л., Шеленок Е. А.** Система нелинейного робастного управления для неаффинного нестационарного динамического объекта с запаздыванием // Автометрия. 2017. **53**, № 2. С. 63–71.
18. **Еремин Е. Л., Чепак Л. В.** Комбинированный регулятор для одного класса неаффинных объектов с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. 2017. **54**, № 4. С. 125–134.

Поступила в редакцию 06.03.2019

После доработки 14.06.2019

Принята к публикации 18.06.2019
