Заключение

Применение наблюдателя в системе робастного управления с ЯНЭМ позволяет не только получить оценки переменных состояния нелинейного объекта, но и задать неявную часть эталона, которая формирует (совместно с явной частью эталона) эталонную модель минимальной структурной сложности для объекта управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Краснова С.А.* Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем: Автореф. дис. д-ра техн. наук – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова, 2003.
3. *Еремин Е.Л., Кван Н.В., Семичевская Н.П., Теличенко Д.А.* Нелинейное робастное управление сложными динамическими объектами.– Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2011.
4. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С.94-101.
5. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С.130-139.
6. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III. // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С.153-164.
7. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. – 2013. – №2(36). – С. 100-106.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Л. Ереминым.
E-mail:
Семичевская Наталья Петровна – npsem@mail.ru.

УДК 684.511

© 2013 г. **Л.В. Чепак,** канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АФФИННОЙ СИСТЕМОЙ ПО ВЫХОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ*

Рассматривается синтез робастного закона управления для аффинной системы с недоступными прямым измерениям переменными состояния. Предложенный алгоритм управления позволяет скомпенсировать в следящей системе внешние и параметрические возмущения с требуемой точностью.
Ключевые слова: аффинная система, робастное управление, наблюдатель, критерий гиперустойчивости.

* Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ в рамках проекта 7.7911.2013 «Проблемы автоматического управления техническими системами в условиях неопределенности».

Введение

В настоящее время разработка алгоритмов управления большинством динамических объектов осложнена целым набором существенных особенностей: нелинейностью, неопределенностью параметров, многомерностью, неопределенностью математической модели, недоступным для прямого измерения состоянием, неконтролируемыми внешними возмущениями и т.д. Значительные трудности в решении подобных задач обусловлены сложностью методов анализа и синтеза нелинейных систем, а также необходимостью получения решений для широкого класса нелинейных объектов. Анализ работ, посвященных решению данной проблемы, а именно – получению универсальных решений, не зависящих от априорной неопределенности параметров нелинейного объекта и внешних неконтролируемых возмущений, показал, что в основном авторами используются два подхода – замена исходной нелинейной системы на приближенную линейную [1, 2] и использование нелинейных канонических форм [3, 4]. Особое внимание при этом уделялось аффинным системам – нелинейным системам, линейным по управлению. В большинстве работ синтезируются законы управления для аффинных систем определенной структуры, с набором дополнительных ограничений. В статье [5] предлагается метод управления нелинейной системой, состоящей из линейного минимально фазового звена и нелинейного статического звена обратной связи. Использование второго метода Ляпунова для разработки нелинейных систем управления ограничено необходимостью построения функции Ляпунова в каждом конкретном случае [6]. При нарушении в нелинейной системе условий согласования используются итеративные процедуры синтеза закона управления, однако они обладает сложностью, а полученный регулятор – большой размерностью [7]. Задача управления нелинейными системами существенно усложняется, если для прямых измерений доступна только выходная переменная, а не весь вектор состояний объекта. Данная проблема требует введения в структуру системы управления специальных фильтров состояния, а в закон управления – дополнительных членов компенсации ошибок наблюдения вектора состояния [7].

В данной работе решается задача управления аффинной системой по выходу в следящем режиме с использованием линейно-нелинейного робастного закона управления, парирующего априорную параметрическую неопределенность, влияние на объект возмущений и ограниченных нелинейностей.

Постановка задачи

Рассмотрим стационарную аффинную систему со скалярным управлением:

$$\frac{dx}{dt} = f(x,\xi) + g(x,\xi)\cdot\big(u(t) + \psi(x,t)\big),\ \ y(t) = h(x),\ \ x(0) = x_0, \qquad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; $f(x, \xi)$, $g(x, \xi)$ – гладкие вектор-функции n-го порядка; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $\psi(x, t)$ – скалярная функция, являющаяся локально липшицевой по x равномерно по t, описывает внутренние и внешние возмущения; $y(t) \in R$ – выход объекта; $h(x)$ – гладкая скалярная функция; ξ – неизвестный параметр, принадлежит известному ограниченному множеству Ξ.

Задачу управления нелинейным неопределенным объектом (1) можно сформулировать следующим образом: найти закон управления, не зависящий от начальных условий и неизвестных параметров ξ, который обеспечит ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и слежение выхода объекта $y(t)$ за эталонным сигналом $y_m(t)$, т.е. выполнение целевого условия:

$$\lim_{t\to\infty}\left|y(t)-y_m(t)\right|\le\sigma,\ \sigma=const>0. \tag{2}$$

Рассмотрим процедуру синтеза робастного закона управления для аффинной системы (1). Предположим, что математическая модель параметрически неопределенного объекта имеет вид:

$$\frac{dx}{dt}=A(x,\xi)x+B(x,\xi)\cdot(u(t)+\psi(x,t)),\ y(t)=x_1,\ \ x(0)=x_0, \tag{3}$$

где для функции $\psi(t)$ выполняется условие $|\psi(t)|\le\psi_0$, $\psi_0=const>0$.

Представим матрицу $A(x,\xi)$ и вектор $B(x,\xi)$ в виде:

$$A(x)=A_m+B_0\alpha^T(x),\ B(x)=B_0(1+\beta(x)), \tag{4}$$

где A_m – гурвицева матрица; $B_0=[0, 0, ..., 1]^T$; $\alpha(x)$, $\beta(x)$ – произвольные векторная и скалярная функции, удовлетворяющие условиям:

$$\alpha^T(x)=(\alpha_1(x),\alpha_2(x),...,\alpha_n(x)),\ \ |\alpha_i(x)|\le\alpha_{0i}^2=const,\ i=\overline{1,n},$$

$$0<\beta(x)\le\beta_0,\ \beta_0=const>0,$$

тогда относительный порядок линейной части объекта (3) будет равен n.

В качестве эталона, задающего в проектируемой системе управления желаемую динамику, аналогично [8 – 11], сформируем следующую модель:

$$\frac{dx_m(t)}{dt}=A_m\cdot x_m(t)+B_m\cdot r(t), \tag{5}$$

$$y_m(t)=L^Tx_m(t), \tag{6}$$

$$v_m(t)=g^Tx_m(t), \tag{7}$$

где $x_m(t)\in R^n$ – переменные состояния; B_m, L – векторы порядка n; $B_m=B_0k_0$, $k_0=$ $=const>0$, $L^T=[1, 0, ..., 0]$, $r(t)\in R$ – задающее воздействие, $r(t)$ – кусочно-непрерывная, ограниченная функция; $y_m(t)\in R$ – выход эталона; $v_m(t)\in R$ – обобщенный выход эталона.

Уравнения эталонной модели (5), (6) будут определять желаемое поведение объекта управления (3), (4), а (5), (7) – задавать желаемую динамику основного контура системы управления.

Передаточная функция эталонной модели объекта управления (5), (6) описывается выражением

$$W_m(s)=L^T(sE-A_m)^{-1}B_m=\frac{1}{a_m(s)}=\frac{1}{a_{m,n}s^n+a_{m,n-1}s^{n-1}+\ldots+a_{m,1}s+1},$$

где $\deg(a_m(s))=n$; $a_m(s)$ – гурвицев полином.

Компоненты вектора g в уравнении (7) определяются коэффициентами гурвицевого полинома $g(s)$: $g(s)=g_n s^{n-1}+g_{n-1}s^{n-2}+\ldots+g_2 s+g_1$, $g_1=1$.

Тогда, следуя [11], если значения вектора g найти из равенства

$$a_m(s)=g(s)\cdot\left(\frac{s}{a_0}+1\right),\ a_0=const>0,$$

передаточную функцию эталона (5), (7) можно записать следующим образом:

$$W_m(s)=g^T\left(sE-A_m\right)B_m=\frac{g(s)}{a_m(s)}=\frac{a_0}{s+a_0}.$$

При этом желаемая динамика основного контура системы управления может быть задана передаточными функциями как явно-неявной эталонной модели (ЯНЭМ) – $W_{ЯНЭМ}(s)=\dfrac{g(s)}{a_m(s)}$, так и явной эталонной модели (ЯЭМ) – $W_{ЯЭМ}(s)=\dfrac{a_0}{s+a_0}$. В последнем случае эталон будет описываться уравнениями

$$\frac{d\varsigma(t)}{dt}=-a_0\cdot\varsigma(t)+a_0\cdot r(t),\ \nu_m(t)=\varsigma(t), \tag{8}$$

где $\zeta(t)\in R$.

Заметим, что использование ЯНЭМ для формирования желаемой динамики основного контура управления $\nu_m(t)$, позволяет в явном виде продемонстрировать желаемую динамику объекта управления $y_m(t)$, которая задается неявно и как будет показано дальше – с помощью наблюдателя состояний объекта недоступных измерению.

Синтез робастной системы управления

Поставленную задачу синтеза робастного закона управления решим в рамках критерия гиперустойчивости, поскольку данный метод является достаточно гибким с точки зрения разработки различных адаптивных и робастных законов управления [12].

Введем в рассмотрение сигнал рассогласования $e(t)=x_m(t)-x(t)$ и запишем относительно этого сигнала уравнение системы (3) – (5), (7) в эквивалентной форме:

$$\begin{cases}\dfrac{de(t)}{dt}=A_m\cdot e(t)+B_0\cdot\mu(t), \quad z(t)=g^T e(t),\\ \mu(t)=k_0 r(t)-\left(1+\beta(x)\right)\cdot u(t)-\left(1+\beta(x)\right)\cdot\psi(x,t)-\alpha^T\left(x\right)x(t),\end{cases} \tag{9}$$

где $z(t)\in R$ – обобщенный выход эквивалентной системы.

Полученный в эквивалентной системе (9) сигнал $\mu(t)$ содержит вектор состояния, который в объекте (3) измерению недоступен. Как известно, для решения задач стабилизации нелинейных систем в условиях неполной информации о состоянии объекта используются статические обратные связи по выходу, но они применяются для динамических систем определенного класса [7].

Другим способом получения информации о состоянии объекта по значениям выходной переменной является построение наблюдателя – специальной динамической системы, состояние которой с течением времени приближается к состоянию исходного объекта управления. При этом состояние наблюдателя в произвольный момент времени рассматривается как оценка состояния системы в данный момент времени [13].

Предположим, что построен наблюдатель:

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = A_m \cdot x_n(t) + B_0 \cdot u(t) + N \cdot \left(y(t) - y_n(t)\right),$$
$$y_n(t) = L^T x_n(t), \quad \nu_n(t) = \bar{g} x_n(t), \tag{10}$$

где $x_n(t) \in R^n$ – переменные состояния наблюдателя; $y_n(t) \in R$ – выход наблюдателя; $\nu_n(t) \in R$ – обобщенный выход наблюдателя; N – постоянный вектор, обеспечивающий заданную динамику оценки состояния системы. Параметры вектора $\bar{g}$ задаются, следуя [14]:

$$\bar{g} = gK^{-1},$$

где K – коэффициент согласования в установившемся режиме обобщенных выходов эталона (5), (7) и наблюдателя (10)

$$K = \lim_{s \to 0} g^T \left(sE - A_*\right)^{-1} N = -g^T A_*^{-1} N .$$

Компоненты вектора N наблюдателя (10) выбираются таким образом, чтобы матрица $(A_m - NL^T)$ была гурвицевой. Поскольку пара (A_m, L) наблюдаема, такой выбор вполне возможен. Следовательно [15], для объекта (3) и наблюдателя (10) ошибки оценок переменных состояния с течением времени будут стремиться к минимальным значениям.

Выбор значений вектора N осуществляется из условия желаемого распределения корней характеристического полинома наблюдателя (10), которые удовлетворяют неравенству [14]:

$$\min_j \mathrm{Re}\left(-\lambda_j\right) \geq \theta \max_i \mathrm{Re}\left(-\lambda_i\right),$$

где λ_i, λ_j – характеристические числа соответственно матриц A_m и $(A_m - NL^T)$; $\theta = const$ – скаляр, который определяет желаемое расположение полюсов на комплексной плоскости при $\theta >> 1$.

Тогда синтез робастного закона управления для системы (3) – (7) можно осуществлять на основе оценок переменных состояния объекта, полученных с помощью наблюдателя (10).

Эквивалентное математическое описание системы (3) – (7), с учетом (10), будет иметь следующий вид:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = A_m \cdot \varepsilon(t) + B_0 \cdot \mu(t),$$
$$\nu(t) = g^T \varepsilon(t), \tag{11}$$
$$\mu(t) = k_0 r(t) - \left(1 + \beta(x)\right) \cdot u(t) - \left(1 + \beta(x)\right) \cdot \psi(x,t) - \alpha^T(x) x_n(t),$$

где $\varepsilon(t) = x_m(t) - x_n(t)$.

Следуя требованиям критерия гиперустойчивости [12], проверим выполнение условия строгой положительной определенности для линейной стационарной части системы (11).

Запишем передаточную функцию указанной системы

$$W_{ЛСЧ}(s) = g^T(sE_n - A_m)^{-1}B_0 =$$

$$= \frac{g^T(sE_n - A_m)^{+}B_0}{\det(sE_n - A_m)} = \frac{g(s)}{k_0 a_m(s)} = \frac{a_0}{k_0(s + a_0)},$$

для которой выполнение условия

$$\mathrm{Re}\{W_{ЛСЧ}(j\omega)\} > 0, \forall \omega \ge 0$$

очевидно.

Перейдем непосредственно к построению робастного закона управления, обеспечивая выполнение интегрального неравенства В.М. Попова [12]:

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(s)\nu(s)ds \ge -\gamma_0^2 = const, \forall t > 0, \tag{12}$$

или, учитывая (11):

$$\begin{aligned}\eta(0,t) = &-\int_0^t k_0 r(s)\nu(s)ds + \int_0^t (1+\beta(x(s)))u(s)\nu(s)ds + \\ &\int_0^t (1+\beta(x(s)))\psi(x,s)\nu(s)ds + \int_0^t \alpha^T(x(s))x_n(s)ds.\end{aligned} \tag{13}$$

Для упрощения процедуры синтеза представим закон управления и интеграл (13) в виде суммы трех слагаемых:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t), \tag{14}$$

$$\begin{aligned}\eta(0,t) = \sum_{i=1}^{3}\eta_i(0,t) = &\left(\int_0^t (1+\beta(x(s)))u_1(s)\nu(s)ds + \int_0^t \sum_{i=1}^{n}\alpha_i(x(s))x_{ni}(s)ds\right) + \\ &+\left(\int_0^t (1+\beta(x(s)))u_2(s)\nu(s)ds - \int_0^t r(s)\nu(s)ds\right) + \\ &+\left(\int_0^t (1+\beta(x(s)))u_3(s)\nu(s)ds + \int_0^t (1+\beta(x(s)))\psi(x,s)\nu(s)ds\right).\end{aligned}$$

Для слагаемого $\eta_1(0,t)$ имеем, с учетом ранее введенных ограничений:

$$\begin{aligned}\eta_1(0,t) = &\int_0^t (1+\beta(x))u_1(s)\nu(s)ds + \int_0^t \sum_{i=1}^{n}\alpha_i(x)x_{ni}(s)\nu(s)ds \pm \\ &\pm \int_0^t (1+\beta(x))\sum_{i=1}^{n}\alpha_{0i}x_{ni}(s)\nu(s)ds \ge \int_0^t (1+\beta(x))u_1(s)\nu(s)ds - \\ &- \int_0^t (1+\beta(x))\sum_{i=1}^{n}\alpha_{0i}x_{ni}(s)\nu(s)ds \pm \int_0^t (1+\beta(x))(1+\beta_0)\sum_{i=1}^{n}\tilde{h}_{1i}x_{ni}^2(s)\nu^2(s)ds \ge \\ &\ge \int_0^t (1+\beta(x))u_1(s)\nu(s)ds - \int_0^t (1+\beta(x))\sum_{i=1}^{n}\alpha_{0i}x_{ni}(s)\nu(s)ds + \\ &+ \int_0^t (1+\beta(x))^2\sum_{i=1}^{n}\tilde{h}_{1i}x_{ni}^2(s)\nu^2(s)ds - \int_0^t (1+\beta(x))(1+\beta_0)\sum_{i=1}^{n}\tilde{h}_{1i}x_{ni}^2(s)\nu^2(s)ds \ge\end{aligned}$$

$$\geq \int_0^t \left(1+\beta(x)\right) u_1(s)\nu(s)ds - \int_0^t \left(1+\beta(x)\right) \sum_{i=1}^n \alpha_{0i} x_{ni}(s)\nu(s)ds +$$

$$+\sum_{i=1}^n \widetilde{h}_{1i}\left(\int_0^t \left(1+\beta(x)\right) x_{ni}(s)\nu(s)ds\right)^2 - \int_0^t \left(1+\beta(x)\right)\left(1+\beta_0\right)\sum_{i=1}^n \widetilde{h}_{1i} x_{ni}^2(s)\nu^2(s)ds \pm$$

$$\pm \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{0i}^2}{4\widetilde{h}_{1i}} \geq \int_0^t \left(1+\beta(x)\right)\left(u_1(s)-\left(1+\beta_0\right)\sum_{i=1}^n \widetilde{h}_{1i} x_{ni}^2(s)\nu(s)\right)\nu(s)ds -$$

$$-\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{0i}^2}{4\widetilde{h}_{1i}} \geq -\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^2}{4\widetilde{h}_{1i}} = -\gamma_{01}^2 = const\,.$$

Приравнивая к нулю выражение в скобках в последнем интеграле и тем самым обеспечивая выполнение интегрального неравенства, получаем первое слагаемое закона управления (14):

$$u_1(t) = \sum_{i=1}^n h_{1i} \cdot x_{ni}^2(t) \cdot \nu(t)\,, \tag{15}$$

где $h_{1i} = \left(1+\beta_0\right)\widetilde{h}_{1i} = const > 0$, $i = 1, \ldots, n$ определяются в процессе имитационного моделирования.

Выполняя аналогичные преобразования для $\eta_2(0,t)$, получаем явный вид второго

$$u_2(t) = h_2 \cdot r^2(t) \cdot \nu(t)\,, \qquad h_2 = \left(1+\beta_0\right)\widetilde{h}_2 = const > 0 \tag{16}$$

и третьего слагаемых уравнения (14)

$$u_3(t) = h_3 \cdot \nu(t)\,,\ h_3 = \left(1+\beta_0\right)\psi_0 \widetilde{h}_3 = const > 0\,. \tag{17}$$

Таким образом, объединяя все три решения (15) – (17), получим искомый закон управления:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n h_{1i} \cdot x_{ni}^2(t) \cdot \nu(t) + h_2 \cdot r^2(t) \cdot \nu(t) + h_3 \cdot \nu(t)\,. \tag{18}$$

Согласно критерию гиперустойчивости [12], выполнение условия строгой положительной определенности линейной стационарной части системы (11) и выполнение интегрального неравенства (12) гарантируют, что рассматриваемая система (3) – (7), (10), (18) является гиперустойчивой и как следствие – робастной, т.е. справедливо неравенство (2).

Пример имитационного моделирования

Проверка работоспособности синтезированного закона управления и определение его параметров осуществлялись в процессе исследования с помощью имитационного моделирования.

Параметры математической модели нелинейного объекта управления (3) задавались в следующем виде:

$$A(x) = A_{\text{НП}} + B_0 a^T(x),$$

$$a^T(x) = \left(a_1(x) \quad a_2(x) \quad a_3(x)\right),$$

$$a_1(x) = \xi_1 arctg(x_1(t)) + \xi_2 \sin(x_2(t)),\ a_2(x) = \xi_3 \sin(x_2(t)) + \xi_4, \tag{19}$$

$$a_3(x) = \xi_5 \cos(x_3(t)) + \xi_6 \sin^2(x_1(t)),$$

$$B(x) = B_0(1 + arctg^2(x_1)).$$

Уровень априорной параметрической неопределенности объекта (19):

$1 \le \xi_1 \le 4$, $0.5 \le \xi_2 \le 2$, $0.1 \le \xi_3 \le 2$, $-6 \le \xi_4 \le -3$, $1 \le \xi_5 \le 3$, $1 \le \xi_6 \le 2$,

Функция, определяющая внешние и внутренние возмущения в объекте (19):

$$\psi(x,t) = \sum_{i=1}^{3} \psi_i(x_i) + \phi(t),$$

$$\psi_i(x_i) = x_i^3, \text{ если } \left|x_i^3\right| < \tilde{\psi}_i,$$

$$\psi_i(x_i) = \tilde{\psi}_i sign\left(x_i^3\right), \text{ если } \left|x_i^3\right| \ge \tilde{\psi}_i,\ \ \tilde{\psi}_i \in [1,\ 20],\ \phi(t) = \sin(t).$$

Параметр явной эталонной модели (8): $a_0 = 1$; задающее воздействие $r(t) = 2\sin(t)\sin(0{,}5t)$.

Структурная схема эталонных моделей вида (5) – (7) представлена на рис. 1.

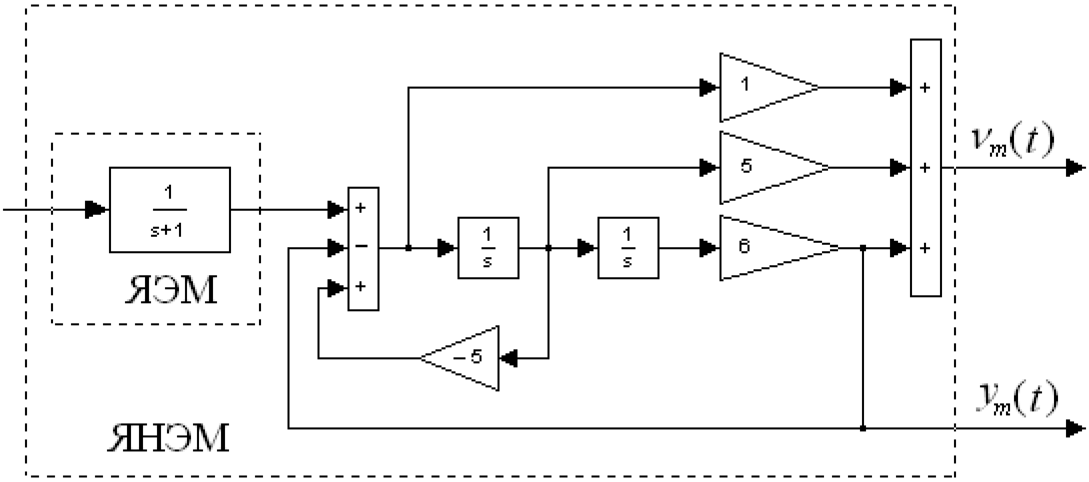

Рис. 1. Структура эталонной модели (5) – (7).

Вычислительные эксперименты, проведенные в программной среде Simulink пакета Matlab, показали, что качество процессов в исследуемой системе (3) – (7), (10), (18), (19) зависит от расположения характеристических чисел матрицы состояния наблюдателя (10) на комплексной плоскости. В рассмотренном примере были заданы характеристические числа матрицы $(A_m - NL^T)$ $\lambda_j = 1500$ и вычислен вектор N.

На рис. 2, 3 представлены результаты имитационного моделирования аффинной системы (3) – (7), (10), (18), (19) при следующих значениях исходных данных: $\xi_1 = 3$, $\xi_2 = 1$, $\xi_3 = 1$, $\xi_4 = -5$, $\xi_5 = 1$, $\xi_6 = 1$, $\tilde{\psi}_i = 20$.

Анализ полученных сигналов позволяет сделать вывод, что синтезированный робастный закон управления обеспечивает системе устойчивость и решает задачу слежения выхода нелинейного объекта (который, в свою очередь, является регулируемой переменной) за выходом эталона. Отметим, что рассогласование между выходами нелинейного объекта (3) и эталонной модели (5), (6) составляет около 0.3 %.

Предложенный алгоритм управления (18) вполне реализуем, так как все его составляющие (15), (16), (17), как показывают полученные результаты, являются ограниченными, гладкими функциями.

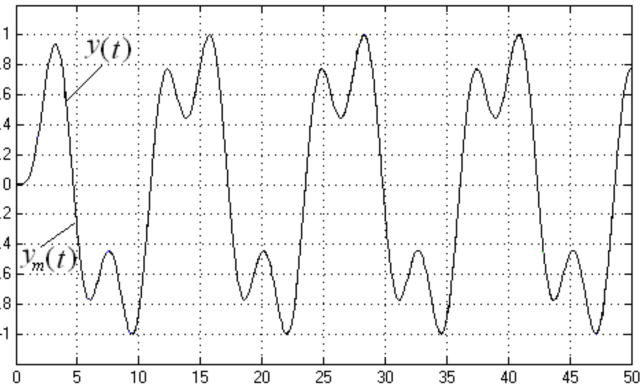

Рис. 2а. Динамика выходов объекта (3), (4) и эталона (5), (6).

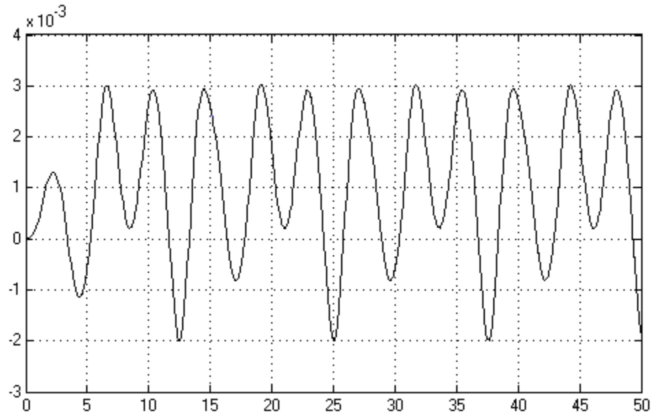

Рис. 2б. Рассогласование между выходами объекта (3), (4) и эталона (5), (6).

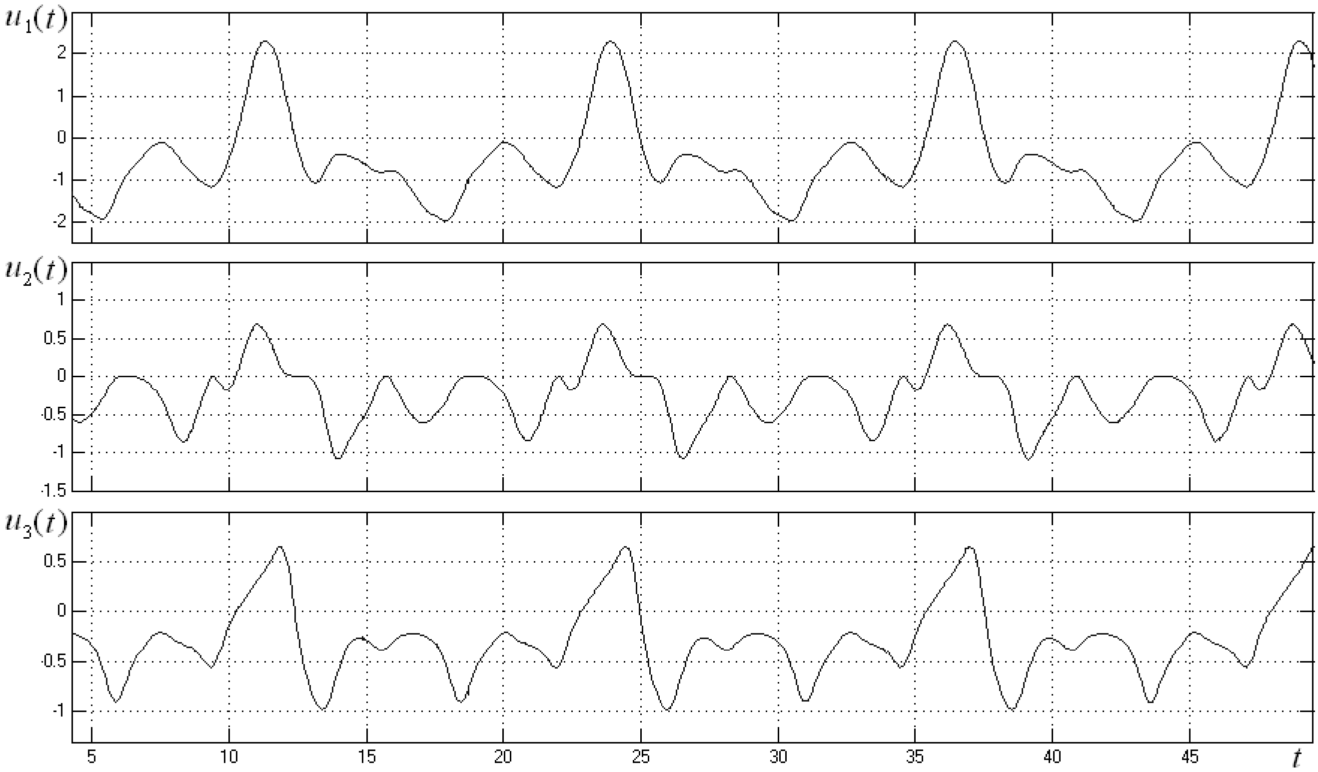

Рис. 3. Составляющие робастного закона управления (18).

Заключение

В работе предлагается достаточно универсальный способ разработки робастных законов управления для аффинных систем с определенной структурой объекта управления.

Алгоритмы управления используют оценку неизмеряемых переменных состояния объекта, полученную с помощью наблюдателя.

Достоинство предложенного робастного регулятора заключается в том, что синтезированный закон управления компенсирует различные нелинейности, внешние и внутренние возмущения в объекте, позволяя решать задачу слежения с хорошим качеством.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Елкин В.И.* О редукции нелинейных управляемых систем к линейным // АиТ. – 2000. – №2. – С.45 – 55.
2. *Елкин В.И.* Построение подсистем для нелинейных управляемых систем // АиТ. – 2010. – №5. – С.11 – 20.
3. *Крищенко А.П., Панфилов Д.Ю., Ткачев С.Б.* Построение минимально фазовых аффинных систем // Дифференциальные уравнения. – 2002. – Т. 38, №11. – С. 1483 – 1489.
4. *Крищенко А.П., Панфилов Д.Ю., Ткачев С.Б.* Глобальная стабилизация аффинных систем с помощью виртуальных выходов// Дифференциальные уравнения. – 2003. – Т. 39, №11. – С. 1503 – 1510.
5. *Бобцов А.А., Николаев Н.А.* Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // АиТ. – 2005. – №1. – С.118 – 129.
6. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. — СПб.: Наука, 2000.
7. *Дружинина М.В. Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // АиТ. – 1996. – №2. – С.3 – 33.
8. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С.94-101.
9. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С.130-139.
10. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III. // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С.153-164.
11. *Еремин Е.Л.* *L*-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. – 2013. – №2(36). – С. 100-106.
12. *Еремин Е.Л., Чепак Л.В.* Алгоритмы робастного нелинейного управления нестационарными скалярными объектами // Информатика и системы управления. – 2007. – №1(13). – С.149 – 160.
13. *Голубев А.Е., Крищенко А.П., Ткачев С.Б.* Стабилизация нелинейных динамических систем с использованием оценки состояния системы асимптотических наблюдателем // АиТ. – 2005. – №7. – С.3 – 42.
14. *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.
15. *Краснова С.А.* Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем: Автореф. дис. д-ра техн. наук – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова, 2003.

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

E-mail:
Чепак Лариса Владимировна – chepak@inbox.ru.