



УДК 684.511

© 2014 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн наук,
Л.В. Чепак, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

РОБАСТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АФФИННЫМ ОБЪЕКТОМ В СХЕМЕ С ДВУМЯ ЭТАЛОННЫМИ МОДЕЛЯМИ

Рассматривается синтез алгоритмов робастной системы с двумя эталонами для управления аффинным объектом, переменные состояния которого недоступны прямому измерению. Показано, что построенный на основе критерия гиперустойчивости закон управления устраняет влияние нелинейностей и компенсирует в следящей системе внешние и параметрические возмущения с требуемой точностью.

Ключевые слова: аффинная система, робастное управление, две эталонные модели, структурное возмущение, фильтр-корректор, критерий гиперустойчивости.

Введение

Значительная часть известных результатов теории автоматического управления связана с исследованием нелинейных динамических объектов, модели которых относятся к классу систем аффинных по управлению [1 – 6]. Задача управления нелинейными системами значительно усложняется, когда прямому измерению доступен только выход объекта, а не полный вектор его переменных состояний. Решение этой проблемы требует введения в замкнутый контур системы специальных устройств наблюдения или оценки состояния, а в закон управления – дополнительных членов, обеспечивающих компенсацию ошибок наблюдения переменных состояний [7].

В данной работе исследуется функционирование робастной системы управления по выходу для аффинного объекта с использованием двух эталонных моделей – основной и вспомогательной. За счет основной эталонной модели (ОЭМ) задается желаемое поведение объекта управления, а с помощью вспомогательной эталонной модели (ВЭМ) формируется требуемая динамика основного контура управления, причем ВЭМ может быть быстродействующей.

Способ построения двух эталонных моделей опирается на включение в основной контур управления фильтр-корректора, предназначенного главным образом для оценки недоступных измерению переменных состояния объекта управления [8 – 12].

Математические модели исходной системы управления

Рассматривается аффинный объект управления (OY):

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

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, является 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 .

Поскольку относительный порядок OY (1) равен n , а его переменные состояния непосредственному измерению недоступны, то для решения задачи управления предпримем специальные меры, в частности для получения оценок переменных состояния OY , на его выход подключим фильтр-корректор (ΦK) [10], описываемый уравнениями:

$$\frac{dx_f}{dt} = Fx_f + B_f y(t), \quad z(t) = q^T x_f(t) + D_f y(t), \quad x_f(0) = 0, \quad (2)$$

$$x_f(t) \in R^{n-1}, \quad z(t) \in R,$$

где $x_f \in R^{n-1}$ – переменные состояния фильтр-корректора; $z(t) \in R$ – выход. Передаточная функция фильтр-корректора имеет вид:

$$W_{\Phi K}(s) = q^T (sE - F)^{-1} B_f + D_f = \frac{g(s)}{(Ts + 1)^{n-1}} + \frac{g_n s^{n-1} + g_{n-1} s^{n-2} + \dots + g_2 s + 1}{T_n s^{n-1} + T_{n-1} s^{n-2} + \dots + T_2 s + 1}, \quad (3)$$

где $g(s)$ – гурвицев полином, $g(s) = g_n s^{n-1} + g_{n-1} s^{n-2} + \dots + g_2 s + 1$; T – малая постоянная времени, значения которой выбираются из соответствующих условий [9, 10].

Известно, что модель OY (1) допускает представление:

$$\frac{dx}{dt} = (A + B_0 \alpha^T(x, \xi))x + (B_0(1 + \beta(x, \xi))) \cdot (u(t) + \psi(x, t)), \quad y(t) = x_1(t), \quad (4)$$

где A – произвольная матрица в форме Фробениуса порядка $n \times n$; B_0 – постоянный вектор порядка n ; $B_0 = [0, 0, \dots, K]^T$; $K = \text{const} > 0$; $x(0) = x_0$ – начальные условия; ξ – неизвестный параметр, принадлежит известному ограниченному множеству Ξ ; $\alpha(x)$, $\beta(x)$ – произвольные векторная и скалярная функции, удовлетворяющие условиям:

$$\alpha^T(x) = (\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x)), \quad |\alpha_i(x)| \leq \alpha_{0i}^2 = \text{const}, \quad i = \overline{1, n}, \quad 0 < \beta(x) \leq \beta_0,$$

$$\beta_0 = \text{const} > 0, \quad |\psi(t)| \leq \psi_0, \quad \psi_0 = \text{const} > 0.$$

Если в математическом описании OY (4) выделить нелинейную часть следующим образом:

$$\mathcal{G}(t) = \alpha^T(x)x + (1 + \beta(x))(u(t) + \psi(x, t)),$$

то линейная часть получит вид

$$\frac{dx}{dt} = A_0 x + B_0 g(t), \quad y(t) = x_1(t), \quad (5)$$

которому соответствует передаточная функция

$$W_{OY}(s) = L^T (sE - A_0)^{-1} B_0 = \frac{K}{a(s)} = \frac{K}{s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1},$$

здесь L – постоянный вектор порядка n ; $L^T = [1, 0, \dots, 0]$; $a(s)$ – полином с произвольным расположением корней; $\deg(a(s)) = n$.

Сформируем желаемую динамику OY (4) за счет эталонной модели (ОЭМ):

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + B_m r(t), \quad y_m(t) = x_{m1}(t), \quad (6)$$

$$W_{OЭМ}(s) = L^T (sE - A_m)^{-1} B_m = \frac{a_{m1}}{a_m(s)},$$

где A_m – гурвицева матрица; $x_m(t) \in R^n$; $y_m(t), r(t) \in R$; $r(t)$ – задающее воздействие; $a_m(s) = \det(sE - A_m)$; $B_m = [0, 0, \dots, a_{m1}]^T$, и зададим закон управления соотношением

$$u(t) = u(x(t), y_m(t), r(t)). \quad (7)$$

Учитывая выполнение для OY (4) и ЭМ (6) условий структурного согласования:

$$A_0 = A_m + B_0 c_0^T, \quad B_0 = B_m a_0, \quad a_0 = \frac{K}{a_{m1}},$$

модель исходной системы управления (4), (6), (7), можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A_m x + B_m \tilde{g}(t), \quad y(t) = x_1(t), \\ \tilde{g}(t) &= \alpha_0 (c_0^T x + \alpha^T(x)x + (1 + \beta(x))(u(t) + \psi(x, t))). \end{aligned} \quad (8)$$

Постановка основной задачи управления

Требуется в системе управления (6), (7), (8) определить явный вид закона управления $u(t)$ таким образом, чтобы, независимо от начальных условий $x(0)$, действующих возмущений $\psi(x, t)$ и набора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$, обеспечивалось бы достижение заданной точности слежения выхода объекта $y(t)$ за эталонным сигналом $y_m(t)$ согласно целевому условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t)| \leq \sigma, \quad \sigma = const > 0. \quad (9)$$

Поскольку в OY (4) прямому измерению доступен только скалярный выход $y(t)$, а не переменные состояния $x(t)$, то техническая реализация закона управления в виде (7) невозможна. В связи с этим с целью построения реального закона управления предварительно решим вспомогательную задачу, а затем воспользуемся следующим вектором оценок переменных состояния исходного OY :

$$\tilde{x}^T(t) = (\tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_{n-1}(t), \tilde{x}_n(t)) = \left(x_{\phi 1}(t), \dots, x_{\phi(n-1)}(t), \left(y(t) - x_{\phi 1}(t) + \sum_{i=2}^n x_{\phi i}(t) T_i \right) / T_n \right).$$

Аналогично работам [11, 12], введем в рассмотрение обобщенный объект управления (*ООУ*) (рис. 1), что позволяет эквивалентно преобразовать математическое описание *ООУ*, представляя его в виде видоизмененного обобщенного объекта управления (*ВООУ*) с блоком структурного возмущения (*БСВ*), показанным на рис. 2. При этом, исключив из рассмотрения *БСВ*, т.е. переходя от *ВООУ* к упрощенному объекту управления (*УООУ*) (рис. 3), можно синтезировать явный вид закона управления.

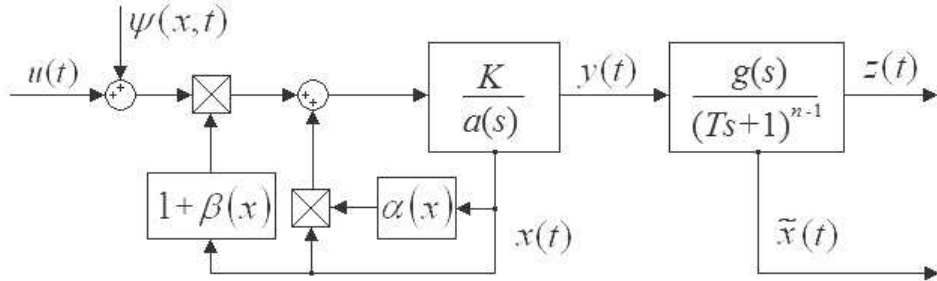


Рис. 1. Исходная структура *ООУ*.

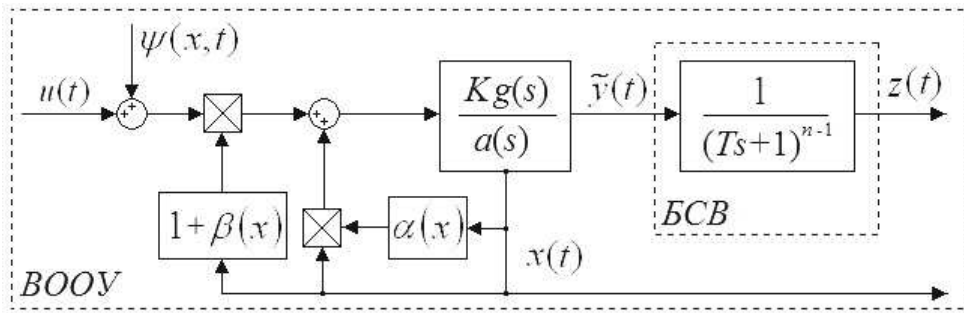


Рис. 2. Видоизмененная структура *ООУ*.

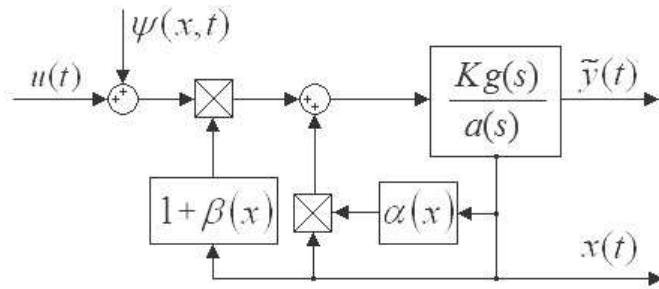


Рис. 3. Упрощенная структура *ООУ*.

Вспомогательная задача управления

В результате эквивалентного перехода от *ООУ* (2), (8) к *ВООУ*, можно записать следующую математическую модель видоизмененного *ОУ*:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_m x(t) + B_m \tilde{g}(t), \quad \tilde{y}(t) = g^T x(t), \quad \tilde{W}_{OY}(s) = g^T (sE - A)^{-1} B_0 = \frac{Kg(s)}{a(s)}, \quad (10)$$

$$\tilde{g}(t) = \alpha_0 (c_0^T x(t) + \alpha^T(x) x(t) + (1 + \beta(x))(u(t) + \psi(x, t))),$$

$$\frac{d\tilde{x}_f(t)}{dt} = \Phi \tilde{x}_f(t) + B_f \tilde{y}(t), \quad z(t) = \tilde{x}_{f1}(t), \quad \tilde{W}_{\Phi K}(s) = L^T (sE - \Phi)^{-1} B_f = \frac{1}{(Ts+1)^{n-1}}. \quad (11)$$

Если же в системе (10), (11) опустить из рассмотрения видоизмененный корректор (БСВ) вида (11), т.е. временно полагая $z(t) = \tilde{y}(t)$, то уравнения (10) будут описывать математическую модель УООУ.

При этом, задавая эталонное движение УООУ (10) уравнениями

$$\frac{d\tilde{x}_m(t)}{dt} = A_m\tilde{x}_m(t) + B_mr(t), \quad \tilde{y}_m(t) = g^T\tilde{x}_m(t) \quad (12)$$

и выбирая значения элементов вектора g из условия – корни полинома $g(s)$ должны совпадать с $(n - 1)$ корнями полинома $a_m(s) = \det(sE - A_m)$, получаем существенное упрощение технической реализации ЭМ (12) в силу соотношения

$$W_{BЭМ}(s) = g^T(sE - A_m)^{-1}B_m = \frac{1}{T_ms + 1}, \quad (13)$$

где $(-T_m^{-1})$ – один из корней полинома $a_m(s)$.

Требуется в упрощенной системе управления (7), (10), (12) определить явный вид закона управления $u(t)$ таким образом, чтобы, независимо от начальных условий $x(0)$, действующих возмущений $\psi(x, t)$ и набора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$, обеспечивалось выполнение предельного неравенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{y}(t) - \tilde{y}_m(t)| \leq \tilde{\sigma}_0, \quad \tilde{\sigma}_0 = const > 0. \quad (14)$$

Аналогично работам [11, 12] можно показать, опираясь на результаты синтеза алгоритма управления $u(t)$ из условий гиперустойчивости системы управления (7), (10), (13), что построенная система будет сохранять работоспособность при наличии структурных возмущений типа (11) за счет выбора соответствующих значений параметров ΦK . При этом как возмущенная система управления (7), (10) – (12), так и исходные системы (6), (7), (8) и (4), (6), (7), утрачивая гиперустойчивость, сохраняют свойство L -диссипативности в заданном классе.

Синтез алгоритма управления $u(t)$

Запишем уравнения системы (7), (10), (12) в отклонениях

$$\begin{cases} \frac{de(t)}{dt} = A_me(t) + B_0\mu(t), & v(t) = g^T e(t), & e(t) = \tilde{x}_m(t) - x(t), \\ \mu(t) = r(t) - \alpha_0(1 + \beta(x))u(t) - \alpha_0(1 + \beta(x))\psi(x, t) - \alpha_0 c_0^T x(t) - \alpha_0 \alpha^T(x)x(t). \end{cases} \quad (15)$$

и представим структуру алгоритма управления (7) в виде

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t). \quad (16)$$

Известно [11], в рамках методики синтеза систем управления на основе критерия гиперустойчивости, что в силу очевидного выполнения для линейной части системы (15) условия $\text{Re} \{W(j\omega)\} > 0, \forall \omega \geq 0$, для нелинейной части системы (15) необходимо определить условия, обеспечивающее разрешение интегрального неравенства В.М. Попова вида:

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(s)v(s)ds \geq -\gamma_0^2 = const, \quad \forall t > 0. \quad (17)$$

Поскольку, с учетом (15), (16,) можно записать соотношение

$$\begin{aligned}
\eta(0,t) &= a_0 \left(\int_0^t (1 + \beta(x(s))) u_1(s) v(s) ds + \sum_{i=1}^n \int_0^t (c_{0i} + \alpha_i(x(s))) x_i(s) v(s) ds \right) + \\
&+ \left(a_0 \int_0^t (1 + \beta(x(s))) u_2(s) v(s) ds - \int_0^t r(s) v(s) ds \right) + \\
&+ a_0 \left(\int_0^t (1 + \beta(x(s))) u_3(s) v(s) ds + \int_0^t (1 + \beta(x(s))) \psi(x,s) v(s) ds \right) = \\
&= \sum_{i=1}^3 \eta_i(0,t),
\end{aligned} \tag{18}$$

то, учитывая ранее указанный набор ограничений, для слагаемого $\eta_1(0,t)$ имеем:

$$\begin{aligned}
\eta_1(0,t) &= a_0 \left(\int_0^t (1 + \beta(x(s))) u_1(s) v(s) ds + \sum_{i=1}^n \int_0^t (c_{0i} + \alpha_i(x(s))) x_i(s) v(s) ds \right) \pm \\
&\pm a_0 (1 + \beta_0) \sum_{i=1}^n h_{1i} \int_0^t (1 + \beta(x(s))) (c_{0i} + \alpha_{0i}^2)^2 x_i^2(s) v^2(s) ds \pm \frac{a_0}{(1 + \beta_0)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{4h_{1i}} \geq \\
&\geq a_0 \int_0^t (1 + \beta(x(s))) \left[u_1(s) - (1 + \beta_0) \sum_{i=1}^n h_{1i} (c_{0i} + \alpha_{0i}^2)^2 x_i^2(s) v(s) \right] v(s) ds - \\
&- \frac{a_0}{4(1 + \beta_0)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{1i}} + a_0 \left\{ (1 + \beta_0) \sum_{i=1}^n h_{1i} \left(\int_0^t (c_{0i} + \alpha_i(x(s))) x_i(s) v(s) ds \right)^2 + \right. \\
&+ \left. \sum_{i=1}^n \int_0^t (c_{0i} + \alpha_i(x(s))) x_i(s) v(s) ds + \frac{1}{4(1 + \beta_0)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{1i}} \right\} \geq \\
&\geq - \frac{a_0}{4(1 + \beta_0)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{1i}} = const, \quad \forall t > 0.
\end{aligned}$$

Обнуляя выражение в квадратных скобках, получаем явный вид первого слагаемого закона управления (16):

$$u_1(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{h}_{1i} x_i^2(t) v(t), \quad \tilde{h}_{1i} = (1 + \beta_0) (c_{0i} + \alpha_{0i}^2)^2 h_{1i}. \tag{19}$$

Аналогично можно получить явный вид и других слагаемых уравнения (16), что в итоге дает искомый закон управления вида:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{h}_{1i} x_i^2(t) v(t) + \tilde{h}_2 r^2(t) v(t) + \tilde{h}_3 v(t), \tag{20}$$

$$\tilde{h}_2 = (1 + \beta_0) a_0 h_2, \quad \tilde{h}_3 = (1 + \beta_0) \psi_0 h_3.$$

Согласно критерию гиперустойчивости [11], выполнение условия строгой положительной определенности линейной стационарной части системы (15) и выполнение интегрального неравенства (17) гарантирует, что упрощенная система (10), (12), (20) является гиперустойчивой и, как следствие – робастной в силу справедливости целевого неравенства (14).

Решение основной задачи робастного управления

Покажем, что из решения вспомогательной задачи следует решение основной задачи управления.

Рассмотрим установившейся режим работы робастной системы (10), (12), (20), переписав уравнение (10) эквивалентным образом

$$(a(p) - c_0(p))v(t) = g(p)\mu(t), \quad (21)$$

используя операторное соотношение

$$a_m(p) = a(p) - c_0(p) = a(p) - c_{0n}p^{n-1} + \dots + c_{02}p + c_{01},$$

отвечающее условиям структурного согласования.

Если теперь в систему (10), (12), (20) вернуть БСВ (11), а затем перейти к технически реализуемому закону управления

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{h}_1 \tilde{x}_i^2(t)v(t) + \tilde{h}_2 r^2(t)v(t) + \tilde{h}_3 v(t), \quad (22)$$

то передаточная функция видоизмененной системы (10), (11), (12), (22), описывающая установившийся режим, будет иметь вид

$$W(s) = \frac{a_{m1}g(s)}{(Ts + 1)^{n-1}a(s) - c_0(s)}.$$

Можно показать, следуя [8 – 12], что L -диссипативность видоизмененной системы (10), (11), (12), (22) зависит от задания в ФК параметра T , величина которого должна быть меньше любого из следующих значений:

$$T_1 = \frac{0.93}{(n-2)a_{m1}}, \quad T_2 = \frac{0.465 a_{m1}}{(n-1)a_{m2}}. \quad (23)$$

При этом, в силу эквивалентности систем (10), (11), (12), (22) и (2), (4), (12), (22), исходная система управления (1), (2), (12), (22), будет L -диссипативной и робастной, поскольку выполнено целевое условие (9).

Имитационное моделирование аффинной системы управления

Оценка качества функционирования синтезированной робастной системы управления (2), (4), (12), (22) и задание значений числовых параметров закона регулирования осуществлялись в процессе имитационного моделирования.

При известном уровне априорной неопределенности

$$1 \leq \xi_1 \leq 4; \quad 0.5 \leq \xi_2 \leq 2; \quad 0.1 \leq \xi_3 \leq 2; \quad -6 \leq \xi_4 \leq -3; \quad 1 \leq \xi_5 \leq 3; \quad 1 \leq \xi_2 \leq 2$$

были заданы следующие параметры:

$$\alpha^T(x) = (\alpha_1(x) \quad \alpha_2(x) \quad \alpha_3(x)), \quad \alpha_1(x) = \xi_1 \arctg(x_1(t)) + \xi_2 \sin(x_2(t)),$$

$$\alpha_2(x) = \xi_3 \sin(x_2(t)) + \xi_4,$$

$$\alpha_3(x) = \xi_5 \cos(x_3(t)) + \xi_6 \sin^2(x_1(t));$$

$$B(x) = B_0(1 + \arctg^2(x_1)); \quad \psi(x, t) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x_i) + \phi(t), \quad \phi(t) = \sin(t);$$

$$\psi_i(x_i) = x_i^3, \quad \text{если } |x_i^3| < \tilde{\psi}_i; \quad \psi_i(x_i) = \tilde{\psi}_i \text{sign}(x_i^3), \quad \text{если } |x_i^3| \geq \tilde{\psi}_i, \quad \tilde{\psi}_i \in [1, 20];$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = 10r(t) + 10\tilde{r}(t),$$

$$\tilde{r}(t) = 0.6 \left(e^{(0.5(1-0.3\cos(0.9\pi t) - 0.5\cos(0.3\pi t) - 0.2\cos(0.1\pi t))) - 0.9} \right) - 0.2;$$

$$r(t) = 2\sin(t)\sin(0.5t); \quad T_m = 1; \quad g(s) = 6s^2 + 5s + 1;$$

$$T_1 \leq 0,084545; \quad T_2 \leq 0,2325; \quad T = 0,0001.$$

В одном из вариантов моделирования аффинной системы (2), (4), (12), (22) были выбраны следующие значения априорно неопределенных параметров:

$$\xi_1 = 3; \quad \xi_2 = 1; \quad \xi_3 = 1; \quad \xi_4 = -5; \quad \xi_5 = 1; \quad \xi_6 = 1.$$

На рис. 4, 3 отражены динамические свойства системы робастного управления (2), (4), (12), (22).

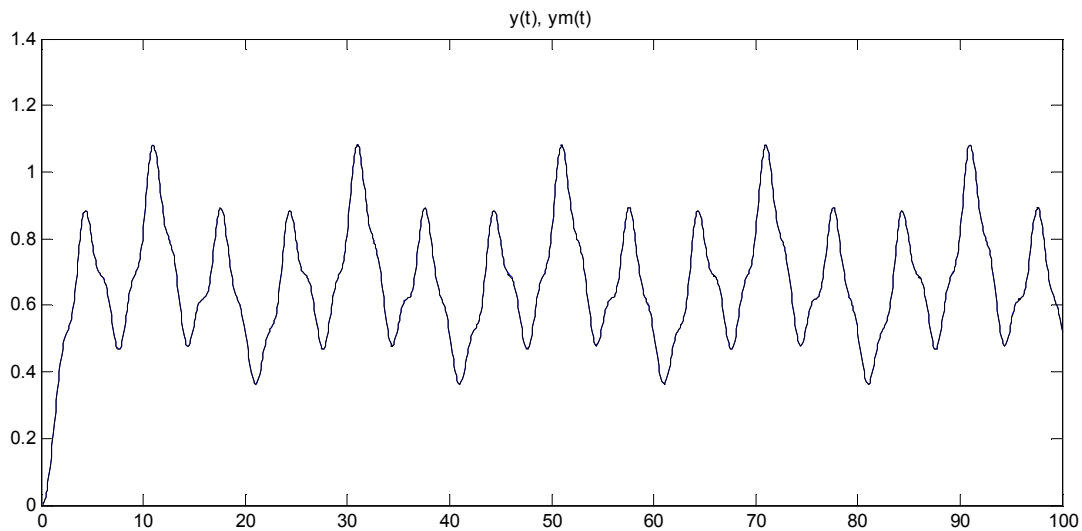


Рис. 4. Динамика выходов ОУ (4) и ЭМ (6).

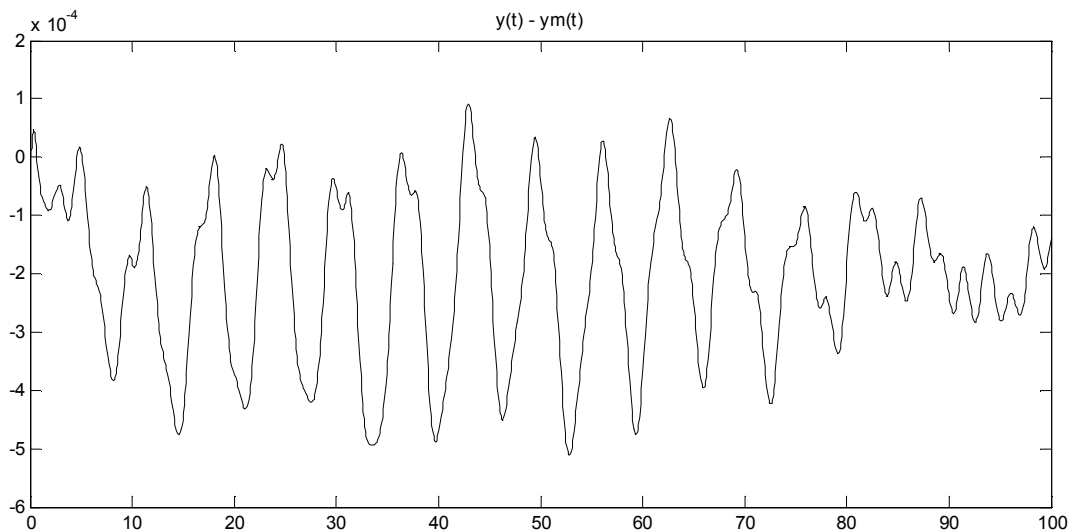


Рис. 5. График сигнала рассогласования между выходами ОУ (4) и ЭМ (6).

Заключение

В данной работе в рамках использования критерия гиперустойчивости и способа структурных возмущений рассматривается подход к построению алгоритмов робастного управления аффинными объектами определенной структуры

со скалярным выходом, не требующий измерения производных от выходного сигнала.

Построенный нелинейный робастный алгоритм управления использует оценки переменных состояния объекта, получаемые с помощью ΦK . Одно из достоинств такого способа построения робастной системы управления состоит в ее ограниченной структурной сложности.

Использование в системе управления схемы с двумя эталонами – $OЭМ$ и $ВЭМ$ – позволило сформировать желаемую модель основного контура системы управления как составную часть эталонной модели объекта управления. В работе рассмотрен случай, когда $OЭМ$ реализуется явно в виде апериодического звена первого порядка, а $ВЭМ$ – явно-неявно.

Притом возможен упрощенный вариант построения контура двух эталонных моделей. В частности, следуя [13], если $OЭМ$ задать быстродействующей и фактически безынерционной (по отношению к динамике $ВЭМ$), то $ВЭМ$ будет формировать желаемую динамику $OУ$ неявно и независимо от $OЭМ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Byrnes C.I., Isidori A., Marconi L.* Further results on output regulation by pure error feedback // Proc. of 16th IFAC World Congress. Prague, Czech Republic, 4-8 July. – 2005. – P. 258-263.
2. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000.
3. *Khalil H.K.* Nonlinear Systems. 3rd ed., Upper Saddle River. – N.J.: Prentice Hall, 2002.
4. *Крищенко А.П., Панфилов Д.Ю., Ткачев С.Б.* Построение минимально фазовых аффинных систем // Дифференциальные уравнения. – 2002. – Т. 38, №11. – С. 1483-1489.
5. *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.
6. *Дружинина М.В. Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С.3-33.
7. *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.3-42.
8. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С.130-139.
9. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С.153-164.
10. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. – 2013. – №2(36). – С.100-106.
11. *Еремин Е.Л., Чепак Л.В.* Робастное управление нелинейной системой с фильтр-корректором // Информатика и системы управления. – 2014. – №1(14). – С.115-126.
12. *Еремин Е.Л., Чепак Л.В.* Робастное управление аффинной системой в схеме с фильтр-корректором // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (электронный ресурс). – М.: ИПУ РАН, 2014 – С.950-959. (CD-ROM).
13. *Еремин Е.Л., Кван Н.В., Семичевская Н.П.* Робастное управление нелинейными объектами с наблюдателем полного порядка и быстродействующей эталонной моделью // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2010. – №5. – С.2-6.

E-mail:

Еремин Евгений Леонидович – ereminel@mail.ru;

Чепак Лариса Владимировна – chepak@inbox.ru.