

УДК 681.51

© 2015 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,  
**З.Д. Пикуль**,  
**Д.А. Теличенко**, канд. техн. наук  
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОДНИМ КЛАССОМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СХЕМЕ С ЯВНОЙ И НЕЯВНОЙ ЭТАЛОННЫМИ МОДЕЛЯМИ\*

Рассматривается адаптивная система управления линейным одноканальным объектом в схеме с двумя эталонными моделями, работоспособная в условиях априорной неопределенности как параметров, так и структуры объекта управления.

**Ключевые слова:** структурно-параметрическая неопределенность, фильтр-корректор, структурное возмущение, критерий гиперустойчивости, адаптивные алгоритмы,  $L$ -диссипативность.

### Введение

У некоторых систем автоматического управления нормальный режим работы допускает как изменение параметров объекта управления, так и модификацию его структуры [1 – 4]. При этом динамика объекта, описываемая одной системой дифференциальных уравнений, переключается на другую под воздействием внешней среды или перемены условий функционирования объекта. Подобные прикладные задачи встречаются в робототехнике, авиастроении, электроэнергетике. В частности, модели динамики объектов с переменными состояниями функционирования рассматриваются в теории энергосберегающего управления различными технологическими установками и транспортными средствами [5].

Зачастую разработку алгоритмов управления в таких системах приходится осуществлять в условиях априорной неопределенности о действии внешних возмущений, значении параметров и характеристик объекта управления. Подобные задачи обычно решаются методами адаптивного или робастного управления. Например, в [6] рассмотрена система адаптивного управления для случая, когда структура линейного объекта на множестве состояний его функционирования ос-

---

\* Работа выполнена по государственному заданию МОН РФ высшим учебным заведениям в рамках проекта «Управление и автоматизация сложных систем в условиях неопределенности», код проекта: 110.

тается неизменной. Однако на практике встречаются ситуации, когда порядки математических моделей объекта управления неизвестны, а определить их значения трудно или невозможно [7]. Как правило, отсутствие информации о порядках объекта управления приводит к появлению дополнительных осложнений, затрудняющих разработку систем управления. Отметим, что некоторые из них могут быть преодолены с помощью подхода, изложенного в [8].

В данной статье рассматривается задача проектирования алгоритмов адаптации для одного класса управляемых по выходу структурно и параметрически неопределенных объектов, передаточные функции которых содержат полиномы с неизвестными степенями, но, подобно [9], имеют известные максимальный и относительный порядки. Решение задачи опирается на выполнение условий  $L$ -диссипативности систем адаптации [10 – 13] и применение аналогов стабилизирующих устройств, рассмотренных в [14, 15].

### Описание исходной система управления и постановка задачи

Рассматривается линейный стационарный  $OY$ , представленный математической моделью в форме "вход–выход":

$$a(p)y(t) = b_m b(p)(u(t) + f(t)), \quad p^i y(0) = y_{i0}, \quad (1)$$

где  $y(t) \in R$  – регулируемый выход;  $y_{i0}$  – начальные условия;  $u(t) \in R$  – управление;  $f(t) \in R$  – внешняя помеха,  $|f(t)| \leq f_0 = const$ ;  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $b_m = const > 0$  – коэффициент;  $a(p)$  и  $b(p)$  – нормированные полиномы

$$a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0,$$

$$b(p) = p^m + b_{m-1}p^{m-1} + \dots + b_1p + b_0.$$

Предполагается, что имеют место следующие допущения:

- 1) полином  $b(p)$  гурвицев;
- 2) коэффициенты  $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_1, a_0$  и  $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$  – неизвестные величины (параметрическая неопределенность  $OY$ ), зависящие от некоторого набора неизвестных параметров  $\xi \in \Xi$ ,  $\Xi$  – известное ограниченное множество;
- 3) степени полиномов  $\deg a(p) = n$  и  $\deg b(p) = m$ , априорно неизвестные числа (структурная неопределенность  $OY$ );
- 4) максимальная степень полинома  $a(p)$  и относительный порядок  $OY$  соответственно  $n_a = \max(n)$  и  $\rho = n - m > 1$  – известные числа;
- 5) прямым измерениям доступен только сигнал  $y(t)$ .

Так как структурная неопределенность присутствует в  $OY$  только при  $n < n_a$ , то с помощью нормированного полинома вида

$$(p + \nu_0)^{n_a - n},$$

где  $\nu_0 = const > 0$  – коэффициент, можно показать, что структурная неопределенность такого типа легко устранима. Действительно, уравнение (1) допускает эквивалентную форму записи

$$c(p)y(t) = b_m d(p)(u(t) + f(t)), \quad (2)$$

где  $c(p)$  и  $d(p)$  – нормированные полиномы:

$$c(p) = a(p)(p + v_0)^{n_a - n} = p^{n_a} + c_{n_a - 1}p^{n_a - 1} + \dots + c_1p + c_0,$$

$$d(p) = b(p)(p + v_0)^{n_a - n} = p^{n_a - \rho} + d_{n_a - \rho - 1}p^{n_a - \rho - 1} + \dots + d_1p + d_0.$$

Очевидно, что в уравнении (2) структурной неопределенности нет, так как степени полиномов  $c(p)$  и  $d(p)$  известны и равны соответственно  $n_a$  и  $(n_a - \rho)$ .

В пространстве состояний уравнению (2) соответствует модель

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B(u(t) + f(t)), \quad y(t) = L^T x(t), \quad x(0) = x_0, \quad (3)$$

где  $x(t) \in R^{n_a}$  – состояния;  $A$  – матрица в форме Фробениуса;  $L^T$  и  $B^T = [0, \dots, 0, 1]$  – векторы порядка  $n_a$ ;  $x_0$  – вектор начальных условий.

Пусть желаемая динамика  $OY$  (3) определена уравнениями

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad y_{M_{OY}}(t) = G^T x_M(t), \quad x_M(0) = 0, \quad (4)$$

где  $x_M(t) \in R^{n_a}$  – переменные состояния;  $r(t) \in R$  – задающее воздействие;  $y_{M_{OY}}(t)$  – выход;  $A_M$  – матрица в форме Фробениуса с требуемым распределением собственных значений;  $G^T = [g_0, g_1, \dots, g_{n_a - 1}]$ ,  $B_M^T = [0, \dots, 0, g_0^{-1}]$  – векторы порядка  $n_a$ .

Считая, что  $OY$  (3) и эталон (4) могут быть структурно согласованы, в силу выполнения условий

$$B_M = Bk_0,$$

$$A_M = A + B_M \chi_0^T,$$

где  $k_0 = const > 0$  – число;  $\chi_0^T = [\chi_{01}, \dots, \chi_{0(n_a - 1)}, \chi_{0n_a}]$  – вектор с постоянными коэффициентами, структуру адаптивного регулятора зададим в виде

$$u(t) = k(t)r(t) - \sum_{i=1}^{n_a} \chi_i(t)x_i(t), \quad (5)$$

где  $k(t)$  и  $\chi_i(t)$  – коэффициенты самонастройки регулятора, алгоритмы которых подлежат определению в ходе решения соответствующей задачи синтеза.

Если модель исходной системы управления (3) – (5) записать в отклонениях  $\Delta x(t) = x_M(t) - x(t)$ , представляя ее уравнениями

$$\frac{d\Delta x(t)}{dt} = A_M \Delta x(t) + B \mathcal{G}(t), \quad \Delta y(t) = y_M(t) - y(t), \quad (6)$$

$$\mathcal{G}(t) = \sum_{i=1}^{n_a} (\chi_i(t) - \chi_{0i})x_i(t) - (k(t) - k_0)r(t) - f(t),$$

где  $\Delta y(t)$  – рассогласование по выходу;  $\mathcal{G}(t)$  – некоторое управление, то основную задачу управления можно сформулировать следующим образом:

в системе управления (6), независимо от начальных условий  $x_0$ , набора параметров  $\xi$  и наличия помехи  $f(t)$ , требуется обеспечить достижение:

1) цели управления

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_{M_{OY}}(t)| \leq \sigma_y, \quad \sigma_y = const > 0; \quad (7)$$

2) целей адаптации

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\chi_i(t) - \chi_{0i}| \leq \sigma_{\chi_i}, \quad \sigma_{\chi_i} = \text{const} > 0, \quad i = 1, \dots, n_a - 1;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |k(t) - k_0| \leq \sigma_k, \quad \sigma_k = \text{const} > 0. \quad (8)$$

Однако в системе управления (6) измерению доступен только выход  $y(t)$ , а значения переменных состояния  $x(t)$  или их оценок неизвестны, т.е. техническая реализация адаптивного регулятора вида (5) невозможна, поэтому далее рассматривается решение *вспомогательной задачи*.

### Вспомогательная задача управления

Пусть фильтр-корректор ( $\Phi K$ ), следуя [6, 15], представлен моделью

$$(p + q_0)^{n_a - 1} y_\Phi(t) = \delta_{\rho-1} \delta(p) y(t), \quad (9)$$

где  $y_\Phi(t)$  – выход  $\Phi K$ ;  $\delta_{\rho-1} = q_0^{n_a - 1} \delta_0^{-1}$  и  $q_0, \delta_0$  – некоторые положительные коэффициенты, причем значение  $q_0$  достаточно большое;  $\delta(p)$  – гурвицев нормированный полином

$$\delta(p) = p^{\rho-1} + \delta_{\rho-2} p^{\rho-2} + \dots + \delta_1 p + \delta_0.$$

Уравнение (9), переходя в пространство состояний, получает вид

$$\frac{dx_\Phi(t)}{dt} = A_\Phi x_\Phi(t) + B_\Phi y(t), \quad y_\Phi(t) = L_\Phi^T x_\Phi(t), \quad x_\Phi(0) = 0, \quad (10)$$

где  $x_\Phi(t) \in R^{n_a - 1}$  – состояния;  $L_\Phi^T, B_\Phi^T = [0, \dots, 0, 1]$  – векторы порядка  $n_a$ ;  $A_\Phi$  – матрица в форме Фробениуса с собственными значениями  $\lambda_i = -q_0, i = 1, \dots, n_a - 1$ , которым соответствует некоторая малая постоянная времени  $T_0 = q_0^{-1}$ . При этом, как показано в [6, 15], переменные состояния  $\Phi K$  будут являться оценками состояний  $OY$ , т.е.:

$$x_\Phi(t) \cong x(t). \quad (11)$$

Так как последовательное соединение  $OY$  и  $\Phi K$ , учитывая (2), (9), описывается уравнением  $c(p)(p + q_0)^{n_a - 1} y_\Phi(t) = b_m \delta_{\rho-1} \delta(p) d(p)(u(t) + f(t))$ , то его можно представить аналогично [6] – как эквивалентное соединение видоизмененного  $OY$  ( $BOY$ )

$$c(p) \tilde{y}(t) = g(p)(u(t) + f(t)), \quad (12)$$

с видоизмененным  $\Phi K$  ( $B\Phi K$ ) вида

$$(T_0 p + 1)^{n_a - 1} y_\Phi(t) = \tilde{y}(t), \quad T_0 = q_0^{-1}, \quad (13)$$

где  $\tilde{y}(t)$  – выход  $BOY$ ;  $g(p) = b_m \delta_0^{-1} \delta(p) d(p)$  – полином степени  $(n_a - 1)$ , коэффициенты которого совпадают с соответствующими элементами вектора  $G$ .

Представим  $BOY$  (12) моделью в пространстве состояний

$$\frac{dx(t)}{dt} = A x(t) + B(u(t) + f(t)), \quad \tilde{y}(t) = G^T x(t), \quad x_0 = x(0). \quad (14)$$

Отметим, что если для  $BOY$  (14) явную эталонную модель ( $ЯЭМ$ ) задать уравнениями (4), то, в случае выбора значения элементов вектора  $G$  из условия

корни полинома  $(g_{(n_a-1)}s^{n_a-1} + g_{(n_a-2)}s^{n_a-2} + \dots + g_1s + g_0)$   
должны совпадать с  $(n_a - 1)$  корнями полинома  $\det(sE - A_M)$ ,

где  $s$  – комплексная переменная, будет упрощена техническая реализация эталонной модели (4), поскольку передаточная функция ЯЭМ (в форме преобразований Лапласа) будет соответствовать аperiодическому звену 1-го порядка

$$W_{ЯЭМ}(s) = G^T (sE - A_M)^{-1} B_M = \frac{a_{n_a}}{s + a_{n_a}},$$

здесь  $(-a_{n_a})$  –  $n_a$ -й корень полинома  $\det(sE - A_M)$ , значение которого задает желаемую динамику как  $BOY$ , так и основного контура управления ( $OKY$ ).

Очевидно, что сигналы на выходе соединений  $OY$  с  $\Phi K$ ,  $BOY$  с  $B\Phi K$  и  $OKY$  – это один и тот же сигнал  $y_\Phi(t) = y_{OK}(t)$ . Фактически это означает, что, формируя с помощью ЯЭМ поведение выхода  $BOY$  или  $OK$  ( $y_{M_{OK}}(t)$ ), одновременно будем формировать и желаемую динамику  $OY$ , но уже за счет ЯЭМ и неявной эталонной модели ( $HЭМ$ ). Действительно, поскольку математические модели  $OY$  и  $BOY$  различаются лишь полиномом  $\delta(p)$ , входящим в уравнение (9), то, задавая требуемое распределение корней этого полинома для  $\Phi K$ , тем самым будем формировать желаемое математическое описание  $HЭМ$ .

Считая  $B\Phi K$  (13) блоком структурного возмущения ( $БСК$ ) и опуская его из рассмотрения, т.е. полагая, что  $(T_0p + 1)^{n_a-1} \cong 1$  и  $y_\Phi(t) \cong \tilde{y}(t)$ , вместо описания (2) воспользуемся моделью (14). Это позволит, применяя оценки переменных состояния  $OY$  вида (11), во-первых, синтезировать явный вид алгоритмов самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора (5), во-вторых, показав, вернув в рассмотрение  $БСК$ , что построенная адаптивная система управления при соответствующем выборе значения параметра  $T_0$  сохранит работоспособность.

Итак, если в регуляторе (5) заменить переменные  $x(t) \rightarrow x_\Phi(t)$ , т.е. перейти к технически реализуемому регулятору

$$u(t) = k(t)r(t) - \sum_{i=1}^{n_a} \chi_i(t)x_{\Phi_i}(t), \quad (15)$$

а модель системы управления  $BOY$  (14), с учетом отклонения  $e(t) = x_M(t) - x_\Phi(t)$ , описать уравнениями в пространстве состояний

$$\frac{de(t)}{dt} = A_M e(t) + B\mu(t), \quad v(t) = G^T e(t) = y_M(t) - y_\Phi(t), \quad (16)$$

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^{n_a} (\chi_i(t) - \chi_{0i})x_{\Phi_i}(t) - (k(t) - k_0)r(t) - f(t),$$

где  $v(t)$  и  $\mu(t)$  – соответственно ошибка регулирования и управляющее воздействие, то вспомогательную задачу управления можно сформулировать следующим образом:

в системе управления (16) требуется определить явный вид алгоритмов самонастройки коэффициентов  $k(t)$  и  $\chi_i(t)$  адаптивного регулятора (5) таким об-

разом, чтобы независимо от начальных условий  $x_0$ , набора параметров  $\xi$  и наличия помехи  $f(t)$  было бы обеспечено достижение целей адаптации (8) и заданной точности слежения выхода  $y_\Phi(t)$  за эталонным сигналом  $y_{MOK}(t)$  согласно целевому условию:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_\Phi(t) - y_{MOK}(t)| \leq \Delta_v = const > 0, \quad (17)$$

где  $\Delta_v$  – заданная точность регулирования в установившемся режиме.

### Построение контура адаптации

Известно, – например, [6, 15], что, синтезируя систему управления на основе критерия гиперустойчивости, требуется решить две проблемы положительности. Для системы управления (16) это означает, что должны быть выполнены:

1) для линейной части системы (16) – частотное неравенство

$$\operatorname{Re} \{W_{BOY}(j\omega)\} > 0, \quad \forall \omega \geq 0; \quad (18)$$

2) для нелинейной части системы (16) – интегральное неравенство

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \mu(s)v(s)ds \geq -\gamma_0^2 = const, \quad \forall t > 0. \quad (19)$$

Существование неравенства (18) очевидно в силу соотношения

$$W_{BOY}(s) = G^T (sE - A_M)^{-1} B = \frac{a_{n_a}}{s + a_{n_a}},$$

а, подобно [6, 16], можно показать, что если адаптивные алгоритмы заданы в виде

$$\frac{d\chi_i(t)}{dt} = \begin{cases} -h_{\chi_i} v(t)x_{\Phi_i}(t), & \forall |v(t)| > \Delta_v, \\ 0, & \forall |v(t)| < \Delta_v, \end{cases} \quad i = 1, \dots, n_a, \quad (20)$$

$$\frac{dk(t)}{dt} = \begin{cases} h_k v(t)r(t), & \forall |v(t)| > \Delta_v, \\ 0, & \forall |v(t)| < \Delta_v, \end{cases}$$

то будут выполняться и неравенства (19).

Таким образом, независимо от значения начальных условий  $x_0$ , действия помехи  $f(t)$  и набора параметров  $\xi$ , из выполнения условия строгой положительной определенности (18) и разрешения интегрального неравенства (19) следует (согласно критерию гиперустойчивости [11]), что система управления (16), (20) является гиперустойчивой, а в силу выполнения целевого неравенства (17) – и адаптивной в заданном классе неопределенности  $\Xi$ .

Таковыми же свойствами будет обладать и система управления (4), (14), (15), (20), эквивалентная системе (16), (20).

### Основная задача адаптивного управления

Покажем, что решение вспомогательной задачи (при выполнении ряда дополнительных условий) приводит к решению основной задачи управления.

Установившийся режим работы системы управления (16), (20), полагая, что  $f(t) \equiv 0$ , можно описать уравнением

$$c_M(p)v(t) = g(p)\mu(t), \quad (21)$$

где  $c_M(p) = \det(pE - A_M)$  – полином, который с учетом условия структурного согласования  $A_M = A + B_M \chi_0^T$  имеет вид  $c_M(p) = c(p) - \chi_0(p)$ ;  $\chi_0(p)$  – полином, соответствующие коэффициенты которого равны установившимся значениям вектора настраиваемых параметров  $\chi(t)$ .

Перепишем уравнение (21) в виде  $(c(p) - \chi_0(p))v(t) = g(p)\mu(t)$ . Тогда, возвращая в рассмотрение БСВ (13), описание установившегося режима работы системы управления (16), (20), с учетом (12), можно представить следующим образом:

$$\left( (T_0 p + 1)^{n_a - 1} c(p) - \chi_0(p) \right) v(t) = g(p)\mu(t). \quad (22)$$

Поскольку уравнению (22) будет соответствовать передаточная функция системы управления

$$W(s) = \frac{g(s)}{(T_0 s + 1)^{n_a - 1} c(s) - \chi_0(s)},$$

с относительным порядком больше единицы, то в таком случае система управления теряет свойство гиперустойчивости, но при этом, как можно показать, следуя [6, 10 – 13], она может быть  $L$ -диссипативной. Для этого достаточно выбрать значение параметра  $T_0$  в описании ФК (9) согласно условиям:

$$T_0 < T_1 = \frac{0.93}{(n-2)c_{M(n_a-1)}}, \quad T_0 < T_2 = \frac{0.465 c_{M(n_a-1)}}{(n-1)c_{M(n_a-2)}}, \quad (23)$$

где  $c_{M(n_a-1)}$ ,  $c_{M(n_a-2)}$  – соответствующие коэффициенты полинома  $c_M(p)$ , поскольку выполнение целевого условия (17) по-прежнему будет иметь место.

Пусть значение  $T_0$  выбрано из условия (23), тогда в силу эквивалентности адаптивных и  $L$ -диссипативных систем (16), (20) и (4), (13) – (15), (20) исходная система управления (1), (4), (9), (15), (20) также окажется адаптивной и  $L$ -диссипативной, что и требовалось показать.

### Вычислительный эксперимент

Оценка качества функционирования разработанной адаптивной системы управления, наряду с выбором значений постоянных коэффициентов контура адаптации и ФК, осуществлялась в ходе имитационного моделирования. В тестовом примере за счет изменения структуры и параметров математического описания ОУ исследовалось их влияние на динамические свойства адаптивной системы управления (1), (4), (9), (15), (20). Рассматривался ОУ (1) с относительным порядком  $\rho = 2$ , передаточные функции которого имели вид

$$y(s) = \frac{b_{11}s + b_{01}}{(s + a_{21})(s + a_{11})(s + a_{01})} u(s), \quad (24)$$

$$y(s) = \frac{b_{02}}{(s + a_{12})(s + a_{02})} u(s), \quad (25)$$

где коэффициенты  $b_{11}$ ,  $b_{01}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{01}$  и  $b_{02}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{02}$  могли принимать любые значе-

ния из следующих известных диапазонов:

$$0.01 \leq b_{11} \leq 0.02, \quad 0.03 \leq b_{01} \leq 0.06, \quad -0.3 \leq a_{21} \leq -0.1, \quad -0.4 \leq a_{11} \leq -0.2, \quad 0.5 \leq a_{01} \leq 1.5;$$

$$0.01 \leq b_{02} \leq 0.02, \quad -0.06 \leq a_{12} \leq -0.03, \quad -0.5 \leq a_{02} \leq -0.3.$$

В одном из вычислительных экспериментов коэффициенты  $b_{11}$ ,  $b_{01}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{01}$ ,  $b_{02}$ ,  $a_1$ ,  $a_{02}$  имели значения:

$$b_{11} = 0.018; \quad b_{01} = 0.045; \quad a_{21} = -0.2; \quad a_{11} = -0.3; \quad a_{01} = 1; \quad (26)$$

$$b_{02} = 0.014; \quad a_1 = -0.05; \quad a_{02} = -0.04. \quad (27)$$

Желаемое поведение ОУ (1) задавалось эталонным уравнением

$$y_{M_{OY}}(s) = \frac{1}{(s+1)(4s+1)} r(s), \quad (28)$$

которое было реализовано в явно-неявном виде, т.е. как с помощью ЯЭМ

$$y_{M_{OK}}(s) = \frac{1}{s+1} r(s), \quad (29)$$

так и за счет НЭМ с использованием ФК:

$$y_{\Phi}(s) = \frac{4s+1}{(T_0s+1)^2} y(s), \quad (30)$$

где постоянная времени  $T_0$ , удовлетворяющая условиям (23), в ходе имитационного моделирования была выбрана со значением  $T_0 = 0.001$  с.

Самонастройка регулятора (15) при  $n_a = 3$  осуществлялась по алгоритмам (20), где коэффициенты контура адаптации были выбраны со значениями:

$$h_{\chi_1} = 2 \cdot 10^4; \quad h_{\chi_2} = 1 \cdot 10^4; \quad h_{\chi_3} = 7 \cdot 10^3; \quad h_k = 8 \cdot 10^3; \quad \Delta_V = 4 \cdot 10^{-4}. \quad (31)$$

Для удобства сравнения реакций исследуемых систем внешние воздействия были одинаковыми, в частности задающий сигнал описывался уравнением

$$r(t) = 0.8(1(t) - e^{-0.125t}) + 0.3(1(t-30) - e^{-0.1(t-30)}) - 0.7(1(t-70) - e^{-0.2(t-70)}), \quad (32)$$

а постоянно действующее возмущение было следующим:

$$f(t) = 0.2 \sin(0.2\pi t) + 0.5 \cdot 1(t-30) - 0.3 \cdot 1(t-70). \quad (33)$$

На рис. 1 изображены графики возмущения  $f(t)$  и выхода  $y(t)$  адаптивных систем управления (15), (20), (24), (26), (29) – (33) и (15), (20), (25), (27), (29) – (33), где (для наглядности) дополнительно изображен график эталонного сигнала  $y_{M_{OY}}(t)$ , поскольку в указанных системах управления он явно не присутствует.

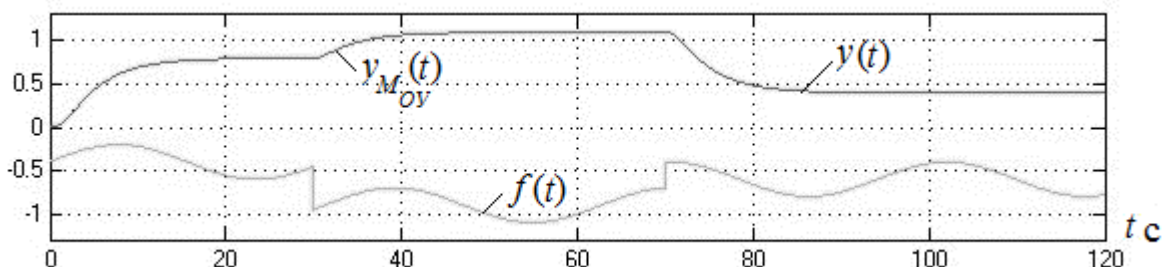


Рис. 1. Графики выходов ОУ (24), ОУ (25), эталона (28) и возмущения (33).

Выходные сигналы  $y(t)$  как у ОУ (24), так и у ОУ (25) практически идентичны сигналу эталона  $y_{M_{OY}}(t)$ , что хорошо видно на рис. 1. Действительно, откло-



нения  $\Delta_{OY}(t) = y_{M_{OY}}(t) - y(t)$  в рассматриваемых системах малы. На рис. 2 отражена динамика отклонений по выходу  $OY$  в системах (15), (20), (24), (26), (29) – (33) (рис. 2а) и (15), (20), (25), (27), (29) (рис. 2б).

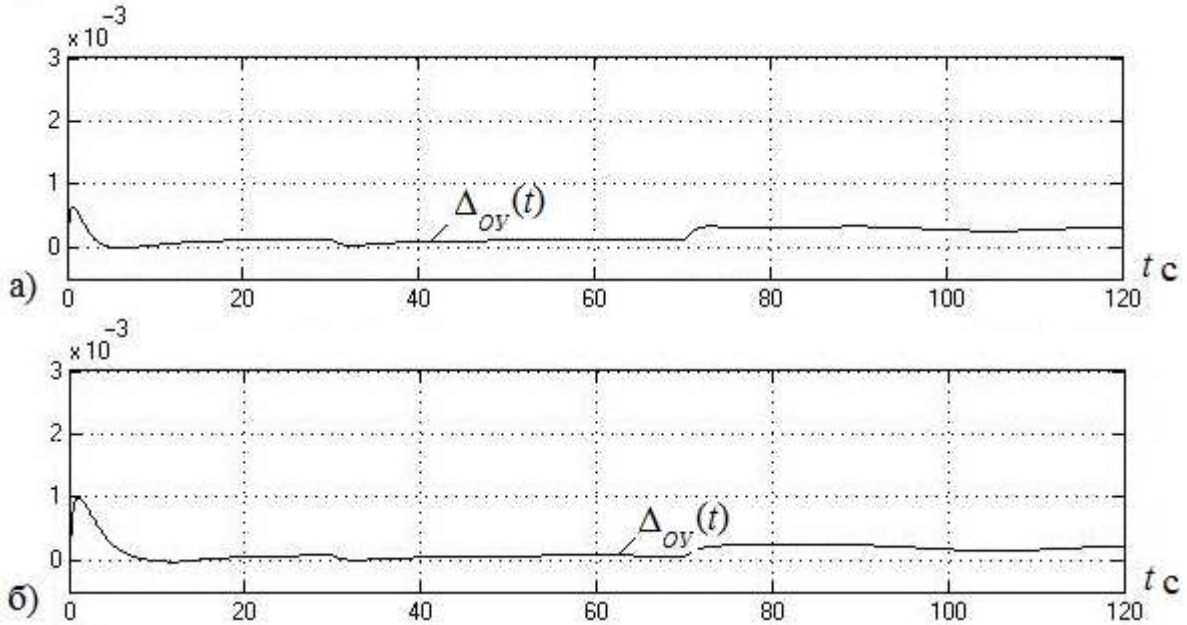


Рис. 2. Графики рассогласований выходов  $OY$ .

Динамика отклонений  $\Delta_{OKY}(t) = y_{M_{OKY}}(t) - y_{\Phi}(t)$ , т.е. по выходу  $OKY$ , изображена на рис. 3, где а – система (15), (20), (24), (26), (29) – (33); б – (15), (20), (25), (27), (29).

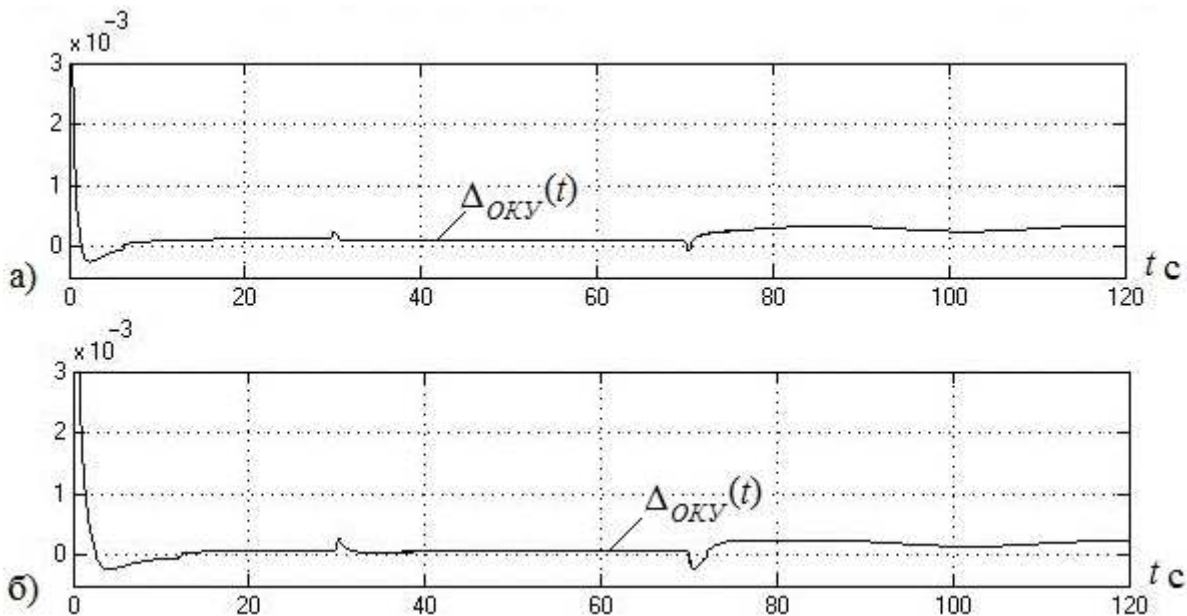


Рис. 3. Графики рассогласований выходов  $OKY$ .

Процессы, протекающие в регуляторе и контуре его самонастройки, приведены соответственно на рис. 4 и 5, где а – система (15), (20), (24), (26), (29) – (33); б – (15), (20), (25), (27), (29). Очевидно, что адаптивная система управления обеспечивает желаемый режим функционирования с заданным качеством в условиях структурно-параметрической неопределенности и наличия помех.

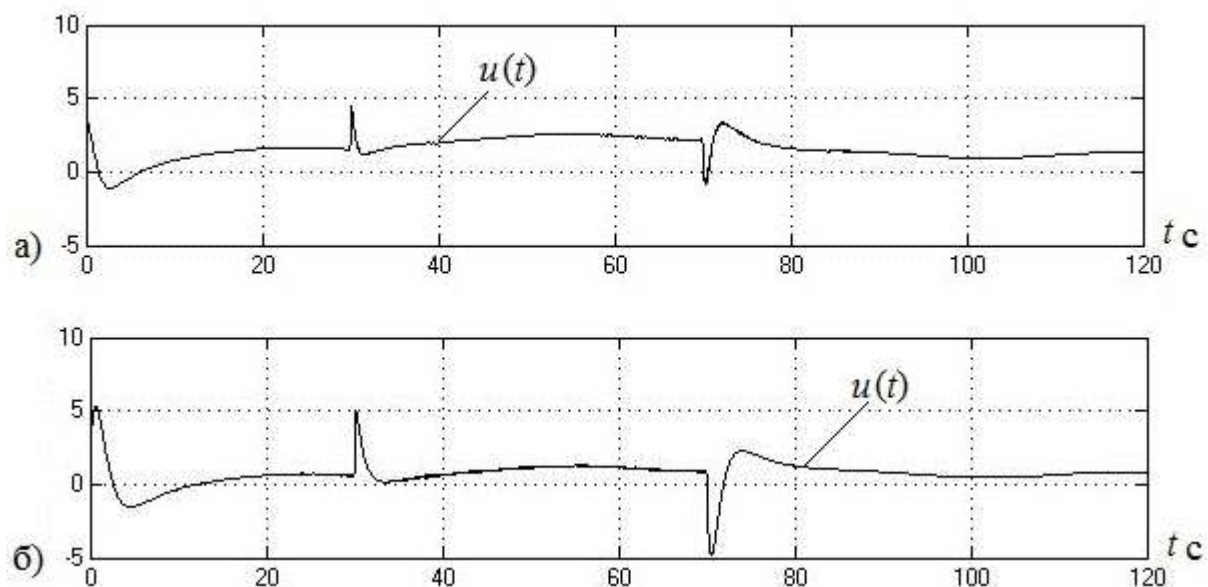


Рис. 4. Графики управляющего воздействия.

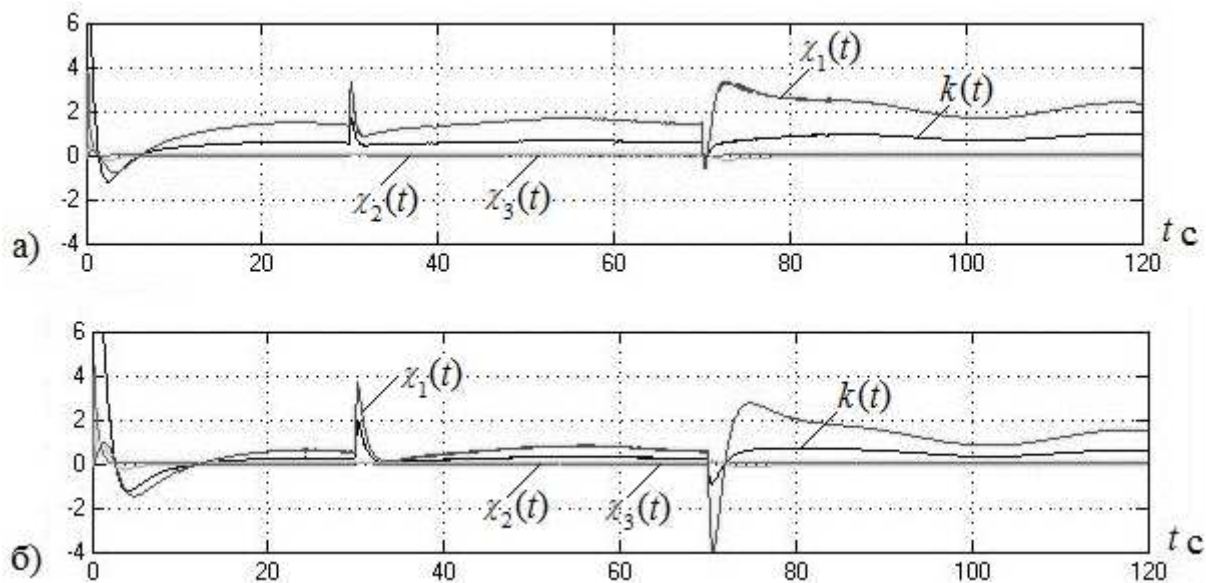


Рис. 5. Графики настраиваемых коэффициентов.

### Заключение

В настоящей работе на основе применения критерия гиперустойчивости и условий  $L$ -диссипативности предложен подход к построению алгоритмов адаптивного управления одноканальными линейными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, когда параметры и структура  $OU$  изменяются произвольным образом в заданных пределах при известном и постоянном значении его относительного порядка. Отличительной особенностью разработанной системы управления является использование явно-неявного эталона, существенно упрощающего техническую реализацию эталонной модели.

Полученные результаты могут быть распространены на  $OU$ , имеющие запаздывания по состоянию и/или управлению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ащепков Л.Т.* Оптимальное управление системой с промежуточными условиями // Прикладная математика и механика. – 1981. – Т.45. – Вып. 2. – С.215-222.
2. *Куржанский А.Б.* О синтезе систем с импульсным управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – №4. – С.2-12.
3. *Чечурин Л.С.* Частотные модели и методы анализа робастности динамических систем: Дис. ... д-ра техн. наук. – СПб.: СПбСПУ, 2010.
4. *Пащенко Ф.Ф., Амосов О.С., Иванов С.Н.* Синтез систем управления электромеханическими преобразователями // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С.18-22.
5. *Матвейкин В.Г., Муромцев Д.Ю.* Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения. – М.: Изд-во "Машиностроение-1", 2007.
6. *Еремин Е.Л.* Адаптивное управление динамическим объектом на множестве состояний функционирования // Информатика и системы управления. – 2012. – №4(34). – С. 107-118.
7. *Бобцов А.А., Никифоров В.О.* Адаптивное управление по выходу: проблематика, прикладные задачи и решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 1(83). – С. 1-14.
8. *Tao G., Ioannou P.A.* Model reference adaptive control for plants with unknown relative degree // IEEE Trans. Automat. Control. – 1993. – Vol. 38, No. 6. – P. 976-982.
9. *Hodgson S.P., Stoten D.P.* Robustness of the minimal control synthesis algorithm with minimal phase plant dynamics of unknown order but known relative degree // International Journal of Control. – 1998. – Vol. 71, No. 1. – P. 1-17
10. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С. 94-101.
11. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С.130-139.
12. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С.153-165.
13. *Еремин Е.Л.* L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. IV // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2(36). – С.100-106.
14. *Мееров М.В.* Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967.
15. *Еремин Е.Л., Чепак Л.В.* Робастная система управления аффинным объектом в схеме с двумя эталонными моделями // Информатика и системы управления. – 2014. – №3(41). – С. 121-129.
16. *Еремин Е.Л.* Нелинейные преобразования алгоритмов прямого адаптивного управления непрерывными объектами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1994.

*E-mail:*

*Еремин Евгений Леонидович – ereminel@mail.ru;*

*Пиккуль Захар Дмитриевич – pikul-z@olekma-gok.ru;*

*Теличенко Денис Алексеевич – telichenko@yandex.ru.*