

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2008, том 44, № 1

УДК 681.513.6

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НЕСКОЛЬКИХ ЭТАЛОННЫХ МОДЕЛЕЙ
В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ***

О. Я. Шpileвая, Е. В. Иваненко

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: shpilev@ait.cs.nstu.ru*

Обсуждаются свойства одноканальных адаптивных систем стабилизации с разными видами эталонных моделей, которые используются для задания динамических и статических свойств. Рассматривается влияние структуры модели, формирующей входное воздействие, на сигнал управления.

Введение. Одна из эффективных возможностей повысить точность работы системы управления в условиях неопределенности математической модели объекта и внешней среды состоит в применении методов адаптивного управления для решения задачи синтеза. Адаптивные регуляторы позволяют в условиях недостаточной априорной информации о характеристиках объекта управления и условиях его функционирования корректировать выходные процессы в автоматическом режиме. Эффект приспособления к условиям функционирования в адаптивных системах обеспечивается за счет накопления и обработки информации о поведении объекта в процессе работы. Это позволяет снизить влияние неопределенности на качество управления и компенсировать недостаток априорной информации на этапе проектирования. Наибольшее распространение получили системы прямого адаптивного управления [1–6], в состав которых входят эталонные модели, формирующие желаемые динамические свойства. В данной работе рассмотрена одноканальная адаптивная система стабилизации, структуры регулятора и адаптора которой определены с помощью функций Ляпунова и метода вектора скорости [7]. Система содержит две эталонные модели. Одна модель, реализованная в явном виде, формирует эталонный входной сигнал и называется формирующим фильтром. Другая модель в неявном виде предназначена для задания желаемых динамических свойств замкнутой системы и реализована с помощью фильтра оценки производных.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00732-а).

Стабилизация нелинейных систем в условиях структурной и параметрической неопределенности осуществляется с помощью робастных [7–9] и (или) адаптивных регуляторов. Для обоих видов систем является актуальной задача уменьшения величины сигнала управления. Известно, что управление достигает своего максимального значения на начальном этапе работы системы, в ряде случаев это происходит в момент включения. В предлагаемой работе исследована возможность снижения требования к ресурсу управления с помощью предварительных фильтров, формирующих входной сигнал замкнутой системы. Выполнен анализ адаптивной системы с двумя видами формирующих фильтров, разработан алгоритм выбора параметров непрерывного формирующего фильтра первого порядка, обоснована структура импульсного формирователя входного сигнала.

Постановка задачи. Рассмотрим линейный одноканальный нестационарный объект управления (ОУ) с моделью

$$y^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t)y^{(i)}(t) = b(t)u(t), \quad (1)$$

где $y(t), u(t)$ – выходная и управляющая переменные соответственно; $a_i(t), b(t)$ – в общем случае неизвестные коэффициенты, принадлежащие ограниченному нестационарному множеству Ω_a , элементы которого ограничены по модулю и темпу изменения, т. е. для $\theta = (a_i, b)^T$ справедливы выражения

$$\max_{t_s \leq t \leq t_f} |\theta_j| < c_{1j}; \quad \max_{t_s \leq t \leq t_f} |\dot{\theta}_j| < c_{2j}, \quad j = \{0, n\}, \quad (2)$$

где $c_{qj} = \text{const} < \infty$; t_s, t_f – начальный и конечный моменты времени соответственно. Объект имеет ресурсное ограничение на управляющее воздействие \tilde{u} . Стабилизация динамических характеристик объекта (1) осуществляется с помощью адаптивного регулятора

$$u = \bar{u}(\bar{y}^{(i)}, u, k_l, \bar{r}), \quad (3)$$

где k_l – вектор настраиваемых коэффициентов:

$$\dot{k}_l = \bar{k}_l(\bar{y}^{(i)}, u, \bar{r}); \quad (4)$$

$\bar{r}(t)$ – выходной сигнал модели:

$$\bar{r} = g(p, \bar{r}, r), \quad (5)$$

в частном случае $\bar{r}(t) = r(t)$ ($r(t)$ – входной сигнал системы), p – оператор дифференцирования; \bar{y} – выходной сигнал фильтра оценки производных:

$$\bar{y} = W(\mu p)y, \quad W(\mu p) = \frac{1}{D(\mu p)}, \quad (6)$$

$\mu = \text{const}$ – малый параметр, $D(\mu p)$ – гурвицев полином, $\text{deg}D(\mu p) = n$. Устройство, описываемое уравнением (5), в дальнейшем называется форми-

рующим фильтром. Алгоритмы (3), (4) определяются с использованием метода вектора скорости [7] и второго метода Ляпунова [10] так, чтобы в системе (1), (3)–(6) выполнялось предельное неравенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |r(t) - y(t)| \leq e_s, \quad (7)$$

где e_s – статическая ошибка регулирования. Цель (7) должна выполняться при условии $u_m < \tilde{u}$, где $u_m = \max_{0 \leq t < \infty} |u(t)|$.

Известно, что в системах, использующих оценки производных выходной переменной, в некоторых режимах работы возникают большие значения управляющего сигнала, так называемые «выбросы» или «скачки» управления. Они зависят от начальных условий, темпа параметрических возмущений и амплитуды эталонного сигнала: $\bar{y}^{(i)}(0)$, c_{2j} , r . В [11] выполнен анализ влияния $\bar{y}^{(i)}(0)$, c_{2j} на управляющий сигнал в адаптивных системах с вектором скорости в алгоритме адаптации. В данной работе исследуется зависимость u_m от $\bar{r}(t)$ и возможность уменьшения $u(t)$ с помощью выбора вида функции $g(p, \bar{r}, r)$.

Описание адаптивной системы стабилизации. Уравнение основного контура определено методом эталонного уравнения. Полагаем, что желаемая динамика системы задана дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} y^{(n)} &= -a_{n-1}^* y^{(n-1)} - a_{n-2}^* y^{(n-2)} - \dots - a_0^* y + a_0^* r = \\ &= F(y^{(n-1)}, y^{(n-2)}, \dots, y, r). \end{aligned} \quad (8)$$

Линейное дифференциальное уравнение (8) описывает неявную эталонную модель. Его коэффициенты получены согласно желаемым показателям качества переходных процессов. При синтезе адаптивного регулятора полного порядка используем уравнение объекта (1), разрешенное относительно старшей производной

$$y^{(n)} = -\sum_{i=0}^{n-1} a_i(t) y^{(i)}(t) + b(t) u(t). \quad (9)$$

Согласно выбранному методу приравниваются правые части (8), (9), полученное уравнение разрешается относительно управляющей переменной и выполняется замена неизвестных параметров настраиваемыми коэффициентами ($k_i, k_b, i = \{0, 1, \dots, n-1\}$):

$$u = k_b^{-1} (F(y^{(n-1)}, y^{(n-2)}, \dots, y, r) + k_{n-1}(t) y^{(n-1)} + \dots + k_0(t) y - k_m). \quad (10)$$

Пусть коэффициенты регулятора образуют вектор $k^T = \{k_i, k_b, k_m\}$ размером $(n+2) \times 1$, тогда алгоритм адаптации на основе метода старшей производной как частного случая метода вектора скорости запишется в виде

$$\dot{k}(t) = \Gamma L(y^{(i)}, u)(y^{(n)} - F), \quad (11)$$

или

$$\dot{k}(t) = \Gamma L_1(y^{(i)}, u) \operatorname{sgn}(L_2(y^{(i)}, u)(y^{(n)} - F)), \quad (12)$$

где Γ – матрица коэффициентов передачи, $\Gamma = \operatorname{diag} \{\gamma_j\}$; $L_i(y^{(i)}, u)$ – вспомогательные вектор-функции. Для сходимости процессов в системах (1), (10), (11) элементы вектор-функции L определяются следующим образом [11]:

$$L(y^{(i)}, u) = (\partial f / \partial k^T)^T, \quad (13)$$

$$\text{где } f = f(k, y^{(i)}, u) = - \sum_{i=0}^{n-1} k_i y^{(i)} + k_b u + k_m.$$

Реализация синтезированного закона управления (10), (11) или (12) требует информацию о производных выходной переменной, оценку которых можно получить с помощью линейной малоинерционной динамической системы (6). Обычно такая система называется либо дифференцирующим фильтром [7], либо фильтром оценки производных (ФОП). Дифференциальное уравнение ФОП имеет вид

$$\mu^n \bar{y}^{(n)} + d_{n-1} \mu^{(n-1)} \bar{y}^{(n-1)} + \dots + d_1 \mu \bar{y}^{(1)} + \bar{y} = y, \quad (14)$$

где d_i – i -й коэффициент демпфирования.

Для объекта управления второго порядка уравнения (8), (10), (13) имеют следующий вид:

$$\ddot{y} = -a_1^* \dot{y} - a_0^* y + a_0^* r(t) = F(\dot{y}, y, r),$$

$$u(t) = \frac{1}{b} (F(\dot{y}, y, r) + k_1(t) \dot{y} + k_0(t) y),$$

$$L(y^{(i)}, u) = (\partial f / \partial k^T)^T,$$

$$f = f(k, y^{(i)}, u) = - \sum_{i=0}^1 k_i y^{(i)} + bu = -k_1 \dot{y} - k_0 y + bu.$$

Из последнего выражения следует, что $l_0 = \frac{\partial f}{\partial k_0} = -y$, $l_1 = \frac{\partial f}{\partial k_1} = -\dot{y}$, поэтому алгоритмы адаптации (11) записываются как

$$\dot{k}_0(t) = \gamma_0 y(\dot{y} - F), \quad \dot{k}_1(t) = -\gamma_1 \dot{y}(\dot{y} - F).$$

Уравнение фильтра (14) соответственно порядку объекта управления имеет вид

$$\mu^2 \ddot{\bar{y}} + 2d\mu \dot{\bar{y}} + \bar{y} = y.$$

Описание формирующих фильтров. Рассматриваются два вида формирующих фильтров (5). Формирующий фильтр первого вида (ФФ1) пред-

ставляет собой аperiodическое звено первого порядка с постоянной времени T_f и коэффициентом передачи k_f :

$$W_f = k_f / (T_f p + 1). \quad (15)$$

Быстродействие процессов в формирующем фильтре должно быть выше, чем быстродействие медленных процессов системы:

$$t_m \approx t_n / 3, \quad (16)$$

где t_m – длительность переходного процесса ФФ1. Выходной сигнал ФФ1 при единичном ступенчатом входном воздействии ($r(t) = 1(t)$) определяется выражением $\bar{r}(t) = k_f(1 - e^{-t/T_f})1(t)$ (рис. 1, а). Время переходного процесса в ФФ1 связано с корневым запасом устойчивости η_f выражением [12]

$$t_m \leq \frac{1}{\eta_f} \ln \frac{1}{e_{s0}}, \quad (17)$$

где e_{s0} – допустимая относительная статическая ошибка.

Последовательность расчета параметров формирующего фильтра первого вида можно свести к следующим этапам:

1. Согласно требованиям, предъявляемым к быстродействию процессов в фильтре (16), находится время переходного процесса. После чего на основании соотношения (17) определяется корневой запас устойчивости.

2. Определяется допустимая область корней, из которой выбирается полюс передаточной функции ФФ1 (p_f).

3. Вычисляется постоянная времени $T_f = 1/|p_f|$.

4. Согласно требованиям к статике процессов в фильтре вычисляется коэффициент передачи.

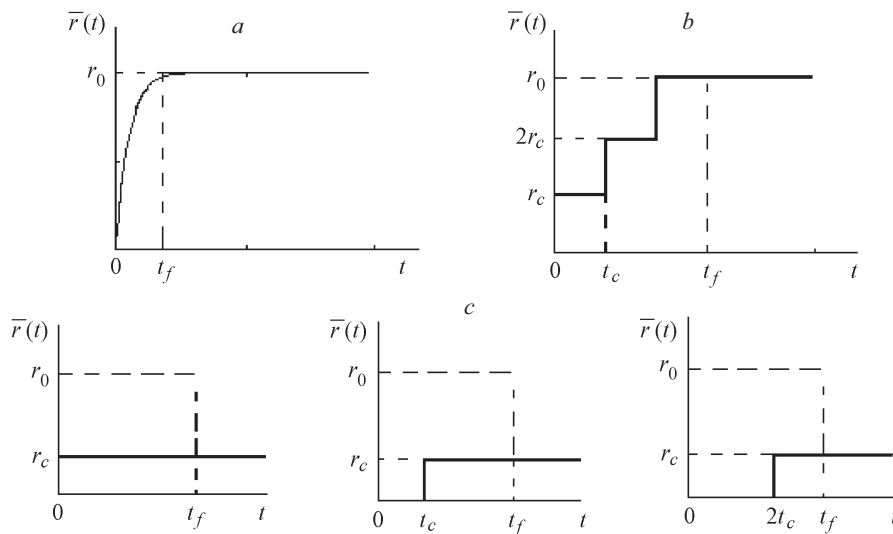


Рис. 1. Выходные сигналы формирующих фильтров: ФФ1 (а) и ФФ2 (b, c)

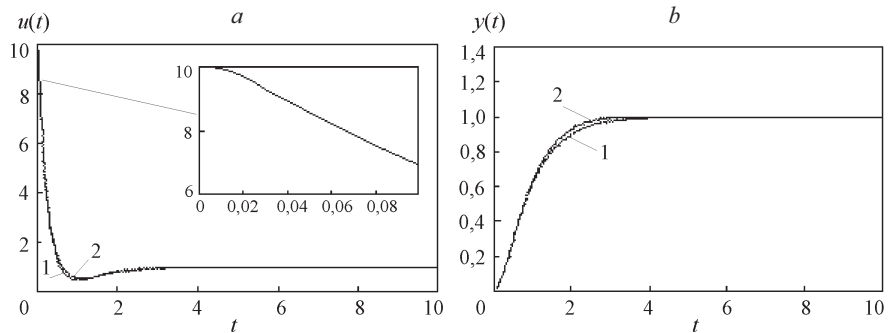


Рис. 2. Процессы в адаптивной системе без возмущений: $a - u(t)$, $b - y(t)$ (кривые 1 – $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$, кривые 2 – $\gamma_0 = \gamma_1 = 2$)

Формирующий фильтр второго вида (ФФ2) вырабатывает импульсный сигнал

$$\bar{r}(t) = \begin{cases} r_c, & 0 \leq t < t_c, \\ ir_c, & it_c \leq t < (i+1)t_c, \quad i \in [1, n_y], \\ r_0, & n_y t_c \leq t < \infty. \end{cases} \quad (18)$$

Вид сигнала для $n_y = 3$ приведен на рис. 1, b . Он характеризуется количеством импульсов n_y , амплитудой $r_i = (r_0/n_y)i = ir_c$ и шагом t_c , что соответствует появлению i -го импульса в момент времени $it_c = (i-1) \frac{1}{n_y - 1} t_{nf}$ (рис. 1, c).

Свойства адаптивной системы без формирующих фильтров. Исследование влияния начальных условий и темпа возмущений на управляющее воздействие в адаптивных системах с вектором скорости в алгоритме адаптации представлено в [11]. Влияние формирующих фильтров на управление изучено на примере системы с объектом второго порядка. Анализ системы без формирующих фильтров, когда $\bar{r}(t) = r(t) = 1(t)$, проведен с целью определения состояния и условий функционирования системы, при которых для парирования возмущений требуется максимальное управляющее воздействие, т. е. для выявления наихудшего случая.

На первом этапе была исследована система (1), (3), (4) со стационарным объектом при нулевых начальных условиях (рис. 2, 3). Увеличение значений коэффициентов передачи адаптора приводит к повышению быстродействия

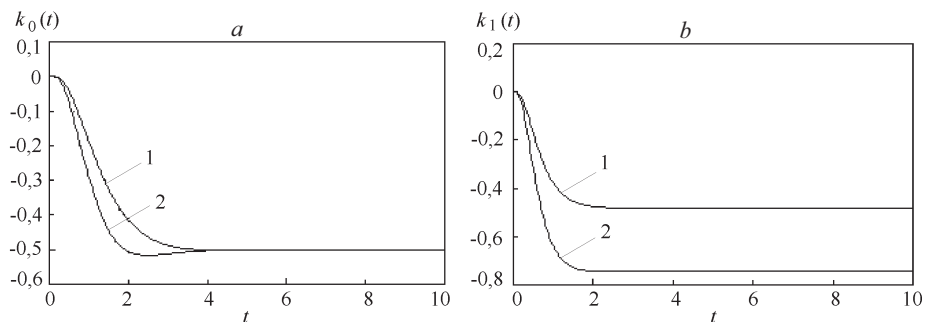
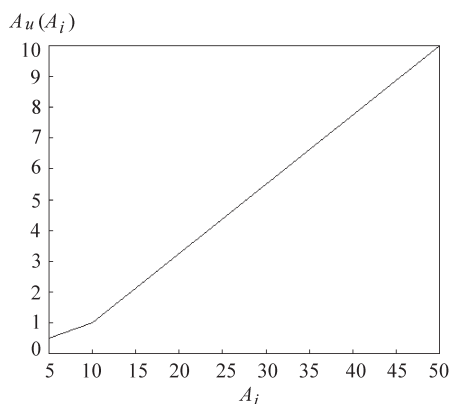


Рис. 3. Процессы на выходе адаптора: $a - k_0(t)$, $b - k_1(t)$

Рис. 4. График зависимости A_u от A_i ($\gamma_0 = \gamma_1$, $x_1(0) = x_2(0) = 0$)



системы. Так для $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ (рис. 2, а, кривая 1) показатели качества удовлетворительные и имеют значения $t_n = 3$ с, $\sigma = 0,02$ %, $e_s = 0,02$, если же $\gamma_0 = \gamma_1 = 2$ (рис. 2, б, кривая 2), то $t_n = 2,5$ с, $\sigma = 0,12$ %, $e_s = 0,02$, где σ – перерегулирование.

На втором этапе исследования был проведен анализ влияния темпа возмущений и начальных условий в объекте на управляющее воздействие. Частота возмущений изменялась в диапазоне $\omega_i \in [0,5, 50]$, начальные условия по выходной координате – в диапазоне $x_1(0) = [-0,3, -0,1, 0, 0,1, 0,3, 0,5]$. Ненулевые начальные условия по координате x_2 мало влияют на динамические свойства системы. Для стабилизации процессов не требуется изменять коэффициенты передачи адаптора. Увеличение модуля $x_1(0)$ приводит к росту u_{\max} . Присутствие параметрических возмущений, изменяющихся по гармоническому закону, влияет на вид управляющего воздействия, т. е. выходной сигнал регулятора содержит гармоническую составляющую. Поэтому кроме максимального значения, возникающего на начальном этапе работы системы, управление характеризуется и амплитудой колебаний. С ростом амплитуды возмущений A_i существенно возрастает величина амплитуды колебаний управляющего воздействия A_u (рис. 4). Зависимость A_u от A_i с достаточной точностью аппроксимируется линейной функцией.

Для систем с нулевыми и ненулевыми начальными условиями были выявлены наихудшие (представляющие интерес для дальнейших исследований) случаи, когда параметры управления A_u и u_{\max} достигают наибольших значений при удовлетворительных показателях качества выходного процесса. Наихудшим для нестационарной системы при нулевых начальных условиях является случай, когда на объект действуют параметрические возму-

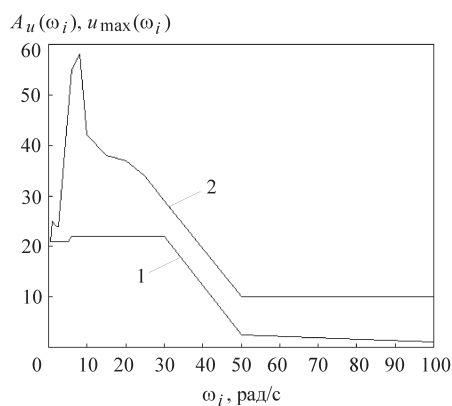


Рис. 5. Графики зависимостей $A_u(\omega_i)$ (кривая 1) и $u_{\max}(\omega_i)$ (кривая 2) ($x_1(0) = 0$)

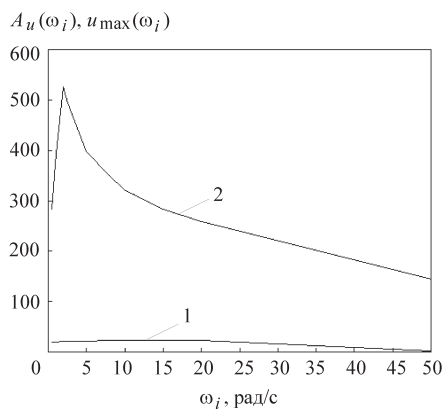


Рис. 6. Графики зависимостей $A_u(\omega_i)$ (кривая 1) и $u_{\max}(\omega_i)$ (кривая 2) ($x_1(0) = -0,3$)

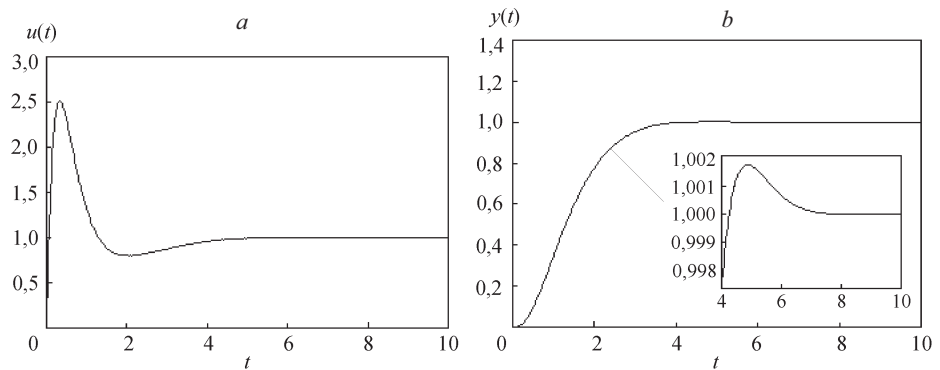


Рис. 7. Процессы в системе со стационарным объектом и ФФ1: $a-u(t), b-y(t)$ ($x_1(0) = x_2(0) = 0, \gamma_0 = \gamma_1 = 2, u_{\max} = 2,5, t_n = 3,4 \text{ с}, \sigma = 0,17 \%, e_s = 0,02$)

щения с $A_i = 10, \omega_i = 8$ (рис. 5), при этом коэффициенты передачи адаптора $\gamma_0 = 70, \gamma_1 = 0$, характеристики управляющего воздействия $u_{\max} = 58, A_u = 22$, показатели качества выходного процесса $t_n = 3,14 \text{ с}, \sigma = 2,7 \%, e_s = 0,02$. При ненулевых начальных условиях максимальные показатели управляющего воздействия ($A_u = 21, u_{\max} = 526$) возникают, если $A_i = 10, \omega_i = 2, x_1(0) = -0,3, \gamma_0 = 130, \gamma_1 = 0$ (рис. 6), а показатели качества имеют значения $t_n = 2,7 \text{ с}, \sigma = 4,7 \%, e_s = 0,02$.

Свойства адаптивных систем с формирующими фильтрами. Эталонная модель на входе системы стабилизации, реализованная в виде динамического звена ФФ1, формирует задающее воздействие и отличается от подобных, ранее используемых, устройств тем, что ее порядок равен единице и не зависит от порядка объекта управления. В системе стабилизации ее функции сводятся к заданию значения выходного сигнала в установившемся режиме и «сглаживанию» входного сигнала объекта управления в начальный момент времени. Процессы, наблюдаемые в системе с ФФ1 при нулевых начальных условиях, отображены на рис. 7, 8. По сравнению с процессами в системе без формирующих фильтров здесь отмечено уменьшение u_{\max} на 75%, при этом быстродействие снизилось в 1,36 раза и на 0,05% возросло перерегулирование.

Структура эталонной модели второго вида ФФ2 (18) зависит от числа импульсов n_y , которые необходимо подавать на вход системы. Были исследованы свойства систем стабилизации при значениях n_y от 2 до 5. Наименьшее значение n_y , при котором система удовлетворяла требуемым показателям качества, равно 3 (рис. 9, 10). В исследуемой системе при нулевых начальных условиях наблюдалось уменьшение величины максимального значения управляющего воздействия на 62,5%, снижение бы-

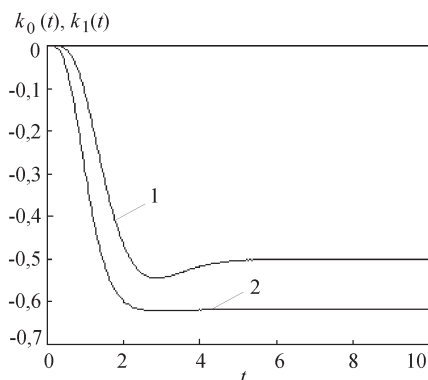


Рис. 8. Процессы на выходе адаптора (кривая 1 – $k_0(t), 2 - k_1(t)$; $x_1(0) = x_2(0) = 0, \gamma_0 = \gamma_1 = 2$)

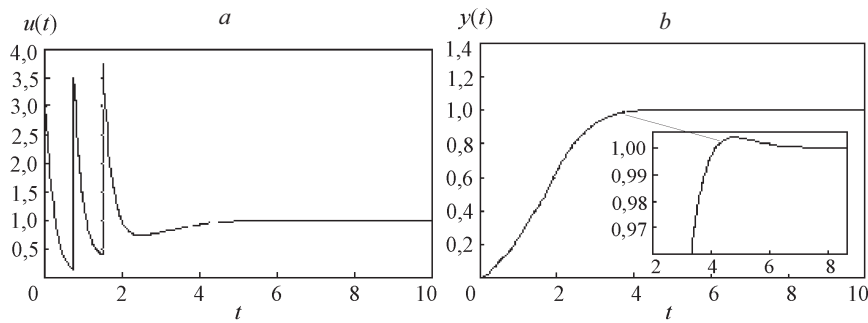


Рис. 9. Процессы в адаптивной системе со стационарным объектом и ФФ2: $a - u(t)$, $b - y(t)$
 $(x_1(0) = x_2(0) = 0, \gamma_0 = \gamma_1 = 2, u_{\max} = 3,75, t_n = 3,56 \text{ с}, \sigma = 0,4 \%, e_s = 0,02)$

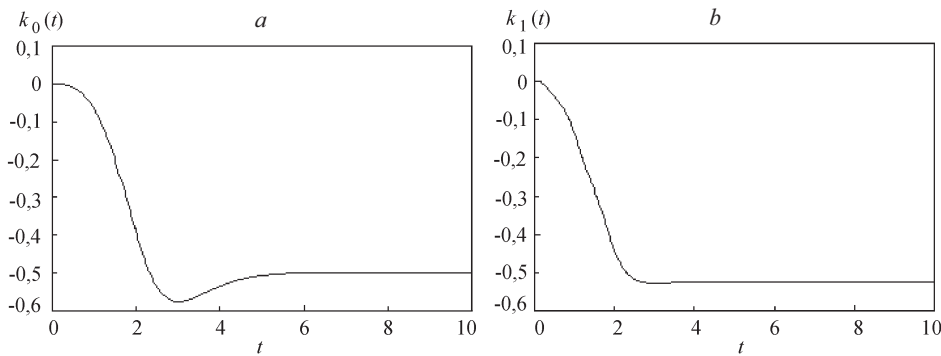


Рис. 10. Процессы на выходе адаптора в системе со стационарным объектом и ФФ2: $a - k_0(t)$,
 $b - k_1(t)$ ($x_1(0) = x_2(0) = 0, \gamma_0 = \gamma_1 = 2$)

стродействия в 1,43 раза и повышение перерегулирования на 0,28 % по сравнению с процессами в системе без формирующего фильтра. Выходные процессы системы с ФФ2 удовлетворяют заданным показателям с небольшим выигрышем по перерегулированию относительно процессов в системе с ФФ1. Это достигается при значительно меньшей величине управляющего воздействия по сравнению с системой без формирователей задающего воздействия.

Основные характеристики процессов в системах с разными видами задающих воздействий и возмущений приведены в табл. 1, 2. В табл. 1 показано

Т а б л и ц а 1

| Тип ОУ | Начальные условия | Уменьшение на Δu_{\max} , % | |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------|
| | | ФФ1 | ФФ2 |
| Стационарный ОУ | $x_1(0) = x_2(0) = 0$ | 75,0 | 62,5 |
| Стационарный ОУ | $x_1(0) = -0,3, x_2(0) = 0$ | 0,53 | 0,58 |
| Нестационарный ОУ | $x_1(0) = x_2(0) = 0$ | 43,1 | 45,7 |
| Нестационарный ОУ | $x_1(0) = -0,3, x_2(0) = 0$ | 2,1 | 6,0 |

Т а б л и ц а 2

| Входной сигнал | Стационарный ОУ ($\gamma_0 = \gamma_1 = 2$) | | | | Нестационарный ОУ ($\gamma_0 = 70, \gamma_1 = 0,001$) | | | |
|----------------|-----------------------------------------------|----------|--------------|-------|---------------------------------------------------------|----------|--------------|-------|
| | u_{\max} | t_n, c | $\sigma, \%$ | e_s | u_{\max} | t_n, c | $\sigma, \%$ | e_s |
| 1(t) | 10,0 | 2,50 | 0,12 | 0,02 | 58,0 | 3,14 | 2,7 | 0,02 |
| ФФ1 | 2,50 | 3,40 | 0,17 | 0,02 | 33,0 | 3,55 | 1,8 | 0,02 |
| ФФ2 | 3,75 | 3,56 | 0,40 | 0,02 | 31,5 | 3,52 | 2,0 | 0,02 |

значение Δu_{\max} , определенное относительно u_{\max} в системе без формирующих фильтров. Введение формирующих фильтров дает максимальный эффект по величине управляющего воздействия при нулевых начальных условиях. Полученные показатели качества представлены в табл. 2. Использование формирующих фильтров позволило получить процессы, показатели качества которых находятся в пределах допустимых значений и при наименьших значениях амплитуды управляющего воздействия.

Заключение. Исследование, проведенное для частного вида одноканальной системы, позволяет сформулировать некоторые общие выводы. Использование формирующих фильтров в системе с нулевыми начальными условиями дает возможность получить выходные процессы желаемого качества при меньшем значении управляющего воздействия. Это связано с тем, что системы с формирующими фильтрами более чувствительны к изменению значений коэффициентов передачи адаптора и заданное качество переходных процессов достигается при меньших значениях коэффициентов передачи. По свойствам системы с разными видами эталонных моделей в качестве формирователей входных сигналов подобны, и выбор между ними в основном определяется сложностью реализации. При ограниченном ресурсе управления в системах стабилизации с вектором скорости в алгоритме настройки коэффициентов следует использовать релейные адапторы и эталонные модели, вырабатывающие входной сигнал заданного вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В. Н., Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Адаптивное управление в технических системах: Учеб. пособие. С.-Пб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2001.
2. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. С.-Пб.: Наука, 2000.
3. Павлов В. Н., Соловьев И. Г. Системы прямого адаптивного регулирования. М.: Наука, 1989.
4. Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И. Н., Земляков С. Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. М.: Машиностроение, 1972.
5. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. Direct Adaptive Control Algorithms. N. Y.: Springer-Verlag, 1994.

6. **Шпилевая О. Я.** Адаптивная стабилизация систем с параметрической неопределенностью на основе принципа локализации // Проблемы управления и информатики. 2004. № 6. С. 19.
7. **Востриков А. С.** Синтез нелинейных систем методом локализации. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1990.
8. **Юркевич В. Д.** Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами. С.-Пб.: Наука, 2000.
9. **Уткин В. И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
10. **Матросов В. М.** Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем. М.: Физматлит, 2001.
11. **Шпилевая О. Я.** Стабилизация динамических характеристик на основе принципа адаптации // Электронная техника. 1993. Сер. 7, вып. 2(177)–3(178). С. 10.
12. **Солодовников В. В., Коньков В. Г.** Корневые методы анализа систем автоматического регулирования. М.: МВТУ, 1986.

Поступила в редакцию 15 декабря 2006 г.
