

УДК 681.511.4

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АДДИТИВНОЙ НАСТРОЙКОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕКТОРА СКОРОСТИ

О. Я. Шпилевая

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»,  
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: oyas07@yandex.ru*

Рассмотрена стабилизация динамической системы с переменными неконтролируемыми возмущениями посредством регулятора, содержащего аддитивную настройку. Переменные параметры представляют собой возмущения в виде кусочно-непрерывных функций. Параметры изменяются в произвольные и неизвестные моменты времени. Адаптивный регулятор и адаптор синтезируются с помощью метода эталонного уравнения и метода вектора скорости соответственно. Замкнутая система имеет обратную связь по производным переменных состояния, что приводит к существованию процессов с различными темпами. Устойчивость системы управления исследуется с помощью общей функции Ляпунова и метода разделения движений. Свойства системы управления иллюстрируются числовым примером.

*Ключевые слова:* адаптивное управление, переменные возмущения, устойчивость, общая функция Ляпунова.

**Введение.** Существует задача адаптивного управления многоканальными динамическими системами, в которых параметрические и аддитивные возмущения изменяются в произвольные и неизвестные моменты времени. Примерами таких объектов являются системы кондиционирования воздуха в самолётах, системы трансмиссии, системы наблюдения за группой роботов и их координации, интеллектуальные транспортные системы и т. д. [1]. В условиях действия быстроменяющихся в широких пределах возмущений типовые регуляторы не обеспечивают требуемых качественных показателей выходных процессов в системах управления. Поэтому для решения задачи управления многоканальными объектами в условиях неопределённости их математических моделей и внешних условий используется принцип адаптации.

В представленной работе адаптивные системы синтезируются с помощью метода эталонного уравнения и метода вектора скорости [2]. Показано, что применение предлагаемого подхода позволяет уменьшить порядок систем прямого адаптивного управления. Так, система с параметрической настройкой приводится к системе с аддитивной настройкой. При этом синтезированные системы имеют обратные связи по производным переменных состояния, что ведёт к процессам с разными темпами. В обсуждаемом подходе используются преимущества, получаемые от обратных связей по производным переменных, а также некоторых свойств рассматриваемого класса возмущений. Адаптивный регулятор и адаптор делают замкнутую систему нелинейной независимо от характеристик объекта управления. Кроме того, в отдельных подсистемах процессы имеют различные скорости. В таких системах анализ устойчивости представляет собой достаточно сложную задачу, для решения которой в данной работе применены общая функция Ляпунова [3] и метод разделения движений.

**Постановка задачи.** Рассмотрим линейную модель многоканальных многорежимных объектов. При переходе от одного режима работы к другому параметры объекта изменяются импульсно:

$$\dot{x}(t) = A_l(t)x(t) + Bu(t); \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где  $x, y, u \in R^m$  — переменные состояния, выходные и управляющие переменные соответственно;  $\det CB \neq 0$ ;  $A_l(t) = \{a_{lij}(t)\}$  — матрица параметров, элементы  $a_{lij}(t)$  которой имеют производные любого порядка в окрестности рабочей точки и удовлетворяют условиям

$$|a_{lij}(t)| < \eta_{lij}^0, \quad |\dot{a}_{lij}(t)| < \eta_{lij}, \quad \eta_{lij}^0, \eta_{lij} = \text{const};$$

индекс переключения (перехода от одного режима к другому)  $l, l = \overline{1, L}$ , равен номеру подсистемы. Интервал времени работы системы в  $l$ -м режиме обозначен через  $\tau_l = t_{l+1} - t_l$ ;  $t_l$  — момент  $l$ -го переключения объекта, в общем случае неизвестный:  $t_0 \leq t_l < t_f$ ;  $t_0, t_f$  — начальный и конечный моменты функционирования системы. Полагаем достаточно медленные переходы от одного режима к другому, т. е.  $(t_f - t_0) > \tau_l > t_n$ , где  $t_n$  — время переходного процесса, и произвольную последовательность смены режимов. Для удобства переключения нумеруются по порядку их возникновения. Гладкая функция  $a_{lij}(t)$  может быть представлена в виде

$$a_{lij}(t) = a_{ij}^0 + \tilde{a}_{lij}(t), \tag{2}$$

причём

$$|\tilde{a}_{lij}(t)| < \tilde{\eta}_{1lij}, \quad |\dot{\tilde{a}}_{lij}(t)| < \tilde{\eta}_{2lij}, \quad \tilde{\eta}_{slij} = \text{const}, \quad s = 1, 2, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad l = \overline{1, L}. \tag{3}$$

Считаем, что  $a_{ij}^0, \tilde{\eta}_{slij}$  известны либо могут быть оценены.

Отметим, что модель (1) может быть получена в результате линеаризации нелинейной характеристики, описывающей динамические свойства объекта, либо (1) представляет работу линейной системы в разных режимах. Подставим (2) в (1) и получим

$$\dot{x}(t) = (A^0 + \tilde{A}_l(t))x(t) + Bu(t); \quad y(t) = Cx(t), \tag{4}$$

где  $\tilde{A}_l(t) = \{\tilde{a}_{lij}(t)\}$ ;  $A^0 = \{a_{ij}^0\}$  — гурвицева матрица, элементы которой могут быть параметрами системы либо в номинальном режиме работы, либо в начальный момент времени.

Задача состоит в определении адаптивного алгоритма управления для стабилизации системы при достаточно медленных и произвольных переключениях объекта:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (r - y(t)) \approx 0, \tag{5}$$

где  $r \in R^m$  — вектор задающих воздействий, при этом в момент переключения должно выполняться условие

$$|y_i(t_l - \xi) - y_i(t_l + \xi)| < \infty, \quad i = \overline{1, m}, \quad l = \overline{1, L}$$

(здесь  $\xi$  — малая величина,  $0 < \xi < 1$ ). Необходимо синтезировать адаптивный регулятор, с использованием которого достигается предельное условие (5).

**Синтез систем с аддитивной настройкой.** С помощью модели возмущений (2)  $l$ -я подсистема (4) описывается уравнением

$$\dot{y}_l(t) = C((A^0 + \tilde{A}_l(t))x(t) + Bu(t)). \tag{6}$$

С учётом свойства рассматриваемого класса возмущений (2) уравнение (6) приводится к виду

$$\dot{y}_l(t) = C(A^0 x(t) + Bu(t)) + M_l(x, t), \tag{7}$$

где  $M_l(x, \tilde{A}_l) = C\tilde{A}_l(t)x(t)$  — новое комбинированное возмущение размера  $m \times 1$ , темп изменения которого зависит от производных  $\tilde{A}_l(t)$  и  $x(t)$  на интервалах  $t_l < t < t_{l+1}$ . Темп  $M_l(x, \tilde{A}_l)$  соизмерим с темпом основных процессов  $l$ -й подсистемы. Учитывая (3) и свойство  $|y_i(t_l - \xi) - y_i(t_l + \xi)| < \infty$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , можно утверждать, что  $\max_t \|\dot{M}_l\| < \tilde{M}$ ,  $\tilde{M} = \text{const}$ ,  $l = \overline{1, L}$ .

Таким образом, в (7) выполнена замена матрицы параметрических возмущений  $A_l \in \mathfrak{S}_{m \times m}$  вектором комбинированных возмущений  $M_l \in \mathfrak{R}_{m \times 1}$ , что привело к уменьшению числа возмущений в модели объекта. Компенсация влияния новых быстрых возмущений на динамические свойства системы возможна при условии, что алгоритм аддитивной настройки будет достаточно быстрым.

На следующем этапе расчёта системы определяется структура адаптивного регулятора на основе метода эталонного уравнения с использованием модели объекта (7).

Пусть желаемые свойства системы соответствуют поведению эталонной модели вида

$$\dot{y}_m(t) = C^*(A^*x_m(t) + B^*r), \quad (8)$$

где  $A^* = \{a_{ij}^*\}$ ,  $B^* = \{b_{ij}^*\}$  и  $C^* = \{c_{ij}^*\}$  — квадратные матрицы с постоянными коэффициентами. Согласно выбранному методу идеальный закон управления имеет вид

$$u = (CB)^{-1}(F - CA^0x - M_l).$$

После замены  $M_l$  матрицей  $K$  размера  $m \times 1$  имеем

$$u = (CB)^{-1}(F - CA^0x - K), \quad (9)$$

где  $\det CB \neq 0$ ;  $F(x(t), r) = C^*(A^*x(t) + B^*r)$ . Так как возмущение  $M_l$  входит в (7) аддитивно, то используется последовательность проектирования системы с сигнальной настройкой. Синтез алгоритма настройки выполняется методом вектора скорости. Для модифицированной модели объекта (6) и закона управления (9) релейный алгоритм сигнальной настройки [2] описывается уравнением

$$\dot{K} = -\Gamma \text{sign}(F - C\dot{x}), \quad (10)$$

где  $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_i\} > 0$  и  $\text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & a > 0, \\ -1, & a < 0. \end{cases}$  В системе (7), (9) и (10) используется вектор производных координат состояния, оценку элементов которого можно получить с помощью линейной малоинерционной подсистемы (фильтра оценки производных) [4].

**Устойчивость систем без фильтра оценки производных.** Устойчивость адаптивной системы с кусочно-гладкими возмущениями исследуем с применением методов, разработанных для непрерывных и переключаемых систем.

Рассмотрим  $l$ -ю подсистему (7), (9), (10). Начнём с определения уравнения обобщённого настраиваемого объекта. Для этого подставим (9) в (7) и получим

$$\dot{y}_l = C^*A^*x + C^*B^*r + M_l - K,$$

где  $\dot{K} = -\Gamma \text{sign}\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_l = F - C\dot{x}_l = K - M_l$ . Пусть  $\Gamma = \gamma I$  ( $I$  — единичная матрица,  $\gamma = \text{const} > 0$ ). Полагаем, что интервалы между соседними моментами переключений достаточно большие:  $\tau_l > t_n$  для всех  $l = \overline{1, L}$ . Сходимость процессов во всех подсистемах анализируется с помощью общей функции Ляпунова

$$V_l = 0,5\varepsilon^T H \varepsilon, \quad H = H^T > 0, \quad l = \overline{1, L}.$$

Полная производная выбранной функции имеет вид

$$\dot{V}_l = \varepsilon^T H \dot{\varepsilon} = \varepsilon^T H (-\dot{M}_l - \gamma \text{sign} \varepsilon).$$

Раскрыв скобки в этом уравнении, имеем

$$\dot{V}_l = -\varepsilon^T H \dot{M}_l - \gamma \varepsilon^T H \text{sign} \varepsilon,$$

из чего следует, что отрицательная определённость  $\dot{V}_l$  достигается, если

$$\gamma > \delta_l, \quad \delta_l = \max_t \|\dot{M}_l\|. \quad (11)$$

Согласно полученному результату сформулируем следующее утверждение.

**Утверждение 1.** Каждая  $l$ -я подсистема (7), (9), (10) глобально асимптотически устойчива, если выполняются условия (3) и (11).

Если справедливы неравенство (3) и предположение об ограниченности координат подсистем и производной комбинированного возмущения  $\dot{M}_l$ , то динамические свойства подсистем, образующих объект управления (1), подобны свойствам соответствующих подсистем (6). При устойчивости каждой замкнутой подсистемы, функционирующей на интервале  $\tau_l$  таком, что  $\tau_l > t_n$ , ограниченность значений выходных переменных при смене режимов работы (переходе от одной подсистемы к другой):  $|y_i(t_l - \xi) - y_i(t_l + \xi)| < \infty$  для  $i = \overline{1, m}$  и  $l = \overline{1, L}$ , является частным случаем условия устойчивости коммутаций векторных полей, приведённого в [5]. С учётом вышесказанного, а также условий асимптотической устойчивости переключаемых систем, полученных в [5], сформулировано следующее утверждение для замкнутой системы (1), (9) и (10).

**Утверждение 2.** Замкнутая система (1), (9) и (10), состоящая из глобально асимптотически устойчивых подсистем, глобально асимптотически устойчива для произвольной последовательности переключений, если

- а)  $|y_i(t_l - \xi) - y_i(t_l + \xi)| < \infty$  для  $i = \overline{1, m}$  и  $l = \overline{1, L}$ ;
- б)  $(t_f - t_0) > \tau_l > t_n$ ;
- в)  $\gamma > \delta_{\max}$ , где  $\delta_{\max} = \max_{1 \leq l \leq L} |\delta_l|$ .

Последнее неравенство представляет собой условие, согласно которому должны выбираться коэффициенты передачи контура настройки.

**Устойчивость систем с фильтром оценки производных.** В системе с кусочно-гладкими возмущениями, быстрым адаптором и фильтром оценки производных, как было отмечено ранее, существуют разнотемповые процессы. Быстрые процессы, порождаемые изменением параметров объекта, т. е. естественными причинами, необходимо компенсировать и тем самым обеспечить свойство грубости системы. Другие быстрые процессы создаются искусственно путём организации обратной связи по производным выходных переменных или координат состояния. В замкнутой системе медленные процессы будут соответствовать эталонной динамике, если обеспечивается устойчивость быстрых процессов. Устойчивость системы с разнотемповыми движениями исследуется с помощью общей функции Ляпунова и метода разделения движений.

В целях оценивания требуемых производных выходных переменных  $l$ -х подсистем вводим в систему фильтр оценки производных (ФОП), динамика которого описывается уравнением

$$\mu_1 \dot{z} = A_z(y_l - z). \quad (12)$$

Здесь  $z \in R^m$  — вектор выходных переменных ФОП;  $(-A_z)$  — гурвицева матрица;  $\mu_1$  — малый параметр, такой что при  $\mu_1$ , близком к нулю, имеем  $z \rightarrow y_l$  и  $\dot{z} \rightarrow \dot{y}_l$ . Задача состоит в определении

- 1) условий устойчивости подсистемы быстрых движений,
- 2) условия сходимости медленных процессов к заданной траектории для системы (1), (9), (10) и (12).

В алгоритме адаптации (10) доопределим функцию  $\text{sign}(g)$  в нуле:

$$\text{sign}(g) \approx P(g), \quad P^T = [p_1, p_2, \dots, p_m], \quad (13)$$

где  $p_i = g_i/(|g_i| + \varphi)$ ,  $\varphi = \text{const}$ ,  $0 < \varphi \leq 1$  [6];  $g = F - \dot{z}$ . С учётом модели ФОП (12) и введённого доопределения разрывной функции (13) адаптивная система на интервале  $t_l \leq t \leq t_{l+1}$  описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{y}_l &= C^*A^*x_l + C^*B^*r + M_l - K; \\ \mu_1\dot{z} &= A_z(y_l - z); \\ \mu_2\dot{K} &= P(g), \quad \mu_2 = 1/\gamma. \end{aligned} \quad (14)$$

Пусть  $\mu_1 < 0,1\mu_2$ , для упрощения записи и без потери общности полагаем  $\mu_2 = 1$ . Введём новое время  $t = \mu_1\tau$  и обозначение  $(a)' = da/d\tau$ , причём  $da/dt = \mu^{-1}da/d\tau$ , тогда (14) приводится к виду

$$\begin{aligned} y_l' &= \mu_1(C^*A^*x_l + C^*B^*r + M_l - K), \\ K' &= \mu_1P(g), \\ z' &= A_z(y_l - z). \end{aligned}$$

Следуя асимптотической методике разделения движений, запишем уравнение подсистемы быстрых движений в обычном времени  $t$ :

$$\mu\dot{z} = A_z(y_l - z).$$

Эта подсистема устойчива, так как по условию  $(-A_z)$  — гурвицева матрица. Рассмотрим подсистему медленных движений:

$$\begin{aligned} \dot{y}_l &= C^*A^*x_l + C^*B^*r + M_l - K, \\ \dot{K} &= \gamma P(g), \end{aligned}$$

где  $g = \varepsilon$ . Согласно утверждениям 1 и 2 данная подсистема асимптотически устойчива для всех  $x, y$  и ограниченных  $M_l$ . Таким образом, если между малыми параметрами выполняется соотношение  $\mu_1 < 0,1\mu_2$ , то адаптивная система (14) асимптотически устойчива.

Теперь рассмотрим случай, когда не только  $\mu_1 < \mu_2$ , но и  $\lim_{\mu_{1,2} \rightarrow 0} (\mu_1/\mu_2) = 0$ . Здесь

наблюдается поэтапное вырождение подсистемы (14), т. е. появляются процессы с тремя различными темпами. Самые быстрые движения происходят в ФОП (12). Процессы в адапторе являются средними по скорости. Они будут также устойчивыми, потому что  $\dot{z} \approx \dot{y}$ . Медленные процессы описываются дважды вырожденной системой и соответствуют эталонной динамике. Это позволяет сделать вывод об асимптотической устойчивости исследуемой системы при рассмотренных соотношениях малых параметров.

Далее выполняется анализ системы при  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ . Очевидно, что подсистема быстрых движений при  $y_l \approx \text{const}$ ,  $x_l \approx \text{const}$  описывается уравнениями

$$\mu \dot{K}_m = P(g); \quad \mu \dot{z} = A_z(y_l - z). \quad (15)$$

Заметим, что эталонная модель формируется не только в соответствии с желаемым качеством выходных процессов, но и с учётом собственных свойств объекта управления. Так, при устойчивом объекте управления справедливо утверждать, что темпы  $F$  и  $\dot{y}_l$  соизмеримы: если  $y_l = \text{const}$ ,  $x_l = \text{const}$ , то имеем  $\dot{y}_l \rightarrow 0$  и  $F \approx 0$ .

Выражения (15) в переменных  $\varepsilon_l$  и  $s_l = z - y_l$  имеют вид

$$\mu \dot{\varepsilon}_l = P(\varepsilon_l, s_l); \quad \mu \dot{s}_l = -A_z s_l. \quad (16)$$

Устойчивость равновесного состояния полученной подсистемы проверяется с помощью функции  $V_l = 0,5s_l^T s_l + 0,5\varepsilon_l^T \varepsilon_l$ , производная которой в силу уравнений (16) имеет вид  $\dot{V}_l = -\mu^{-1}\varepsilon_l^T P - \mu^{-1}s_l^T A_z s_l$ . Учитывая свойство функции  $P(\varepsilon_l, s_l)$ , имеем  $\varepsilon_l^T P > 0$  для всех  $s_l$  и  $\varepsilon_l$ . Кроме того,  $s_l^T A_z s_l > 0$ , поэтому  $\dot{V}_l < 0$ . Отсюда следует, что  $s_l \rightarrow 0$  и  $\varepsilon_l \rightarrow 0$ . Таким образом, в системе (16) равновесное состояние  $s_l = 0$ ,  $\varepsilon_l = 0$  является асимптотически устойчивым.

Медленные движения также устойчивы, поскольку описываются уравнениями динамики эталонной модели  $\dot{y} = C^* A^* x_l + C^* B^* r = F$ . Проведённые исследования доказывают следующее

**Утверждение 3.** Адаптивная система (14) с возмущениями, удовлетворяющими (2) и (3), локально асимптотически устойчива, если

$$(t_f - t_0) > \tau_l > t_n, \quad \gamma > \delta_{\max}, \quad \mu_1 < \mu_2 \text{ или } \mu_1 \approx \mu_2.$$

Выполнение этих условий обеспечивает сходимость медленных процессов системы (14) к заданной траектории. Последнее из возможных соотношений малых параметров  $\mu_1 > \mu_2$  не рассматриваем, так как в этом случае адаптивная система с разнотемповыми процессами имеет неустойчивые быстрые процессы [7].

**Пример.** Пусть модель двухканального объекта управления задана в виде

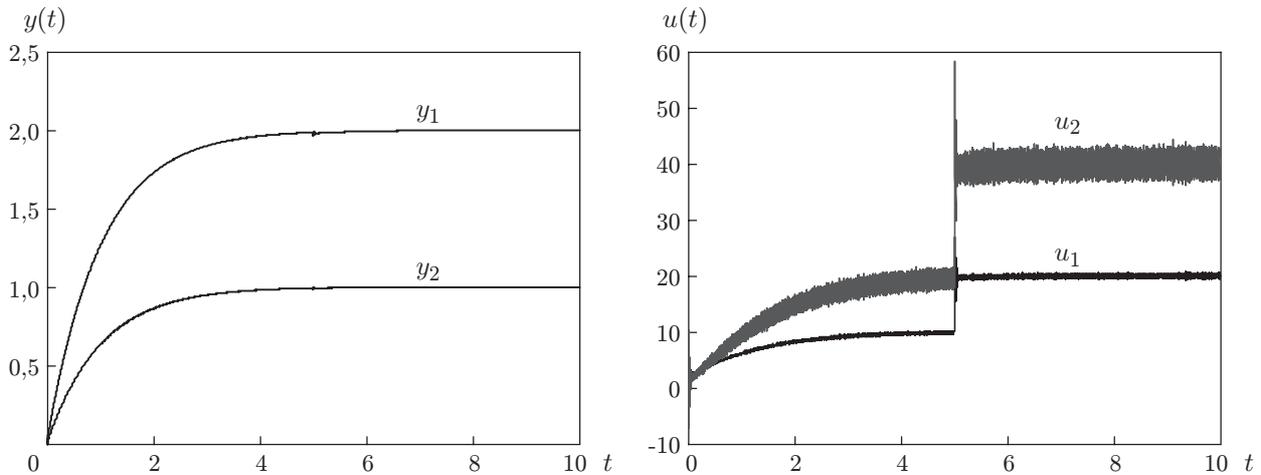
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + u_1, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + u_2, \end{cases}$$

$$y_1 = x_2, \quad y_2 = x_3.$$

В номинальном режиме элементы матрицы можно записать как

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 \\ 2,5 & -4 & 0,5 \\ 10 & -3,5 & -3 \end{bmatrix}.$$

На выходах системы требуется обеспечить монотонные процессы с быстродействием  $t_n = 3,5$  и относительной статической ошибкой  $e_s \leq 5\%$ . Время перехода от первой подсистемы ко второй  $t_1 = 5$ , эталонные входные сигналы  $r_1 = 2 \cdot 1(t)$  и  $r_2 = 1(t)$ .



Графики выходных процессов и управляющих воздействий в замкнутой системе

Матрица объекта в начальный момент работы  $A_0$  выбрана равной номинальной матрице:  $A_0 = A$ . После перехода в другой режим работы матрица коэффициентов принимает значение  $A_1 = 2A_0$ . Согласно заданным показателям качества переходных процессов желаемые динамические свойства замкнутой системы описываются уравнением  $\dot{y} = F = -y + r$ , где  $y^T = [y_1 \ y_2]$ ,  $r^T = [r_1 \ r_2]$ .

С учётом изложенного в данной работе подхода сначала определим уравнение идеального закона управления:

$$u_i = -a_{(i+1)2}^0 y_1 - a_{(i+1)3}^0 y_2 - y_i + r_i + M_{li},$$

где  $M_{li} = -\tilde{a}_{l(i+1)2} y_1 - \tilde{a}_{l(i+1)3} y_2 - m_{li}$ . Далее, заменив  $M_{li}$  настраиваемым параметром  $k_i$ , получим вид реального закона:

$$u_i = -a_{(i+1)2}^0 y_1 - a_{(i+1)3}^0 y_2 - y_i + r_i + k_i, \quad i = 1, 2.$$

Отметим, что при выполнении моделирования системы в законе управления были использованы неточные значения коэффициентов объекта управления в начальный момент времени, т. е. присутствовало ненулевое параметрическое рассогласование:  $A(t_0) = 1,5A_0$ , где  $A(t_0) = \{a_{(i+1)j}^0\}$ . Алгоритм изменения  $k_i$  выбран в виде выражения (10).

Траектории выходных и управляющих переменных приведены на рисунке. Коэффициенты адаптора и фильтров оценки производных имеют значения:  $\gamma_{1j} = 50$ ,  $\gamma_{2j} = 70$  и  $\mu_1 = \mu_2 = 0,01$ . Время переходного процесса в каналах составило  $t_{n1} = t_{n2} = 3,02$ . Максимальные значения настраиваемых параметров регулятора  $|k_1|_{\max} = 6,77$ ,  $|k_2|_{\max} = 14,73$ , где  $|k_i|_{\max} = \max_{t_0 \leq t \leq t_n} |k_{ij}(t)|$ ,  $i = 1, 2$ .

Графики иллюстрируют устойчивость процессов при одновременном изменении параметров объекта в 2 раза, возникающем в результате действия внешних возмущений. При нулевых начальных условиях в момент времени  $t_0$  и последующем изменении параметров объекта в момент  $t_1$  переходные процессы в системе соответствуют эталонным процессам с заданной точностью.

**Заключение.** Рассмотренный в данной работе подход к синтезу управляющих устройств для многоканальных объектов с кусочно-гладкими параметрами характеризуется применением только аддитивной (или сигнальной) настройки переменных параметров регулятора. Особенностью предложенного алгоритма адаптации является высокое

быстродействие благодаря использованию рассогласования между текущими и эталонными значениями вектора первых производных координат состояния. Следует отметить, что алгоритм адаптации вида (10) может быть получен на основе дифференциальной формы алгоритма скоростного градиента [8]. Таким образом, показано, что объектами с кусочно-гладкими параметрическими возмущениями или с несколькими режимами работы, каждый из которых имеет свою матрицу параметров, можно управлять с помощью одного регулятора. Другая особенность приведённых результатов состоит в том, что при исследовании устойчивости синтезированной системы использованы теоремы, полученные для переключаемых систем и систем с разнотемповыми процессами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Davrazos G., Koussoulas N. T.** A review of stability results for switched and hybrid systems // Proc. of the 9th Mediterranean Conf. on Control and Automation. Dubrovnik, Croatia, 2001. URL: [http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Hybrid\\_systems/med01-169.pdf](http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Hybrid_systems/med01-169.pdf) (дата обращения: 17.03.2011).
2. **Vostrikov A. S., Shpilevaya O. Y.** Nonlinear control systems with fast adaptive algorithm // Proc. of the IASTED Intern. Conf. on Modelling, Identification, and Control. Grindelwald, Switzerland, 2004. P. 444–449.
3. **Narendra K. S., Balakrishnan J.** A common Lyapunov function for stable LTI systems with commuting A-matrices // IEEE Trans. Automat. Control. 1994. **39**, N 12. P. 2469–2471.
4. **Vostrikov A. S., Shpilevaya O. Y.** Adaptive control systems with two-scale motions // Proc. of the Intern. Conf. on Physics and Control. Saint Petersburg, Russia, 2005. P. 799–804.
5. **Mancilla-Aguilar J. L.** A condition for the stability of switched nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. 2000. **45**, N 11. P. 2077–2079.
6. **Ambrosino J., Calentano J., Jarofalo F.** Variable structure model reference adaptive control systems // Intern. Jour. of Control. 1984. **39**, N 6. P. 1339–1349.
7. **Шпилевая О. Я.** Исследование разнотемповых процессов в адаптивной системе // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2009. № 6. С. 46–52.
8. **Fradkov A. L.** Speed-gradient laws of control and evolution // Proc. of the 1st European Control Conference (ECC). Grenoble, France, 1991. P. 1861–1865.

*Поступила в редакцию 17 марта 2011 г.*

---