

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ С ПАРНЫМИ И НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

А. А. Дыда, В. Е. Маркин

*Институт автоматики и процессов управления, г. Владивосток*

Рассмотрена проблема управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности. Предложены качественно новые алгоритмы и системы адаптивного управления с переменной структурой с использованием парных и нелинейно деформируемых поверхностей переключения. На примере простых адаптивных систем с переменной структурой показано, что предлагаемый подход позволяет существенно улучшить динамические показатели работы системы, снизив при этом энергетические затраты на управление в скользящем режиме.

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных проблем современной теории управления состоит в разработке новых высокоэффективных законов управления сложными динамическими объектами в условиях структурно-параметрической неопределенности. В качестве подобных объектов могут рассматриваться космические и подводные аппараты, манипуляционные роботы и др. Математические модели таких объектов управления существенно нелинейные и многомерные. Кроме того, практически невозможно получить полное уравнение модели объекта вследствие его параметрической неопределенности. Все эти факторы существенно затрудняют построение качественного управления сложными динамическими объектами. Методы линейной теории управления зачастую не позволяют достичь приемлемых динамических показателей работы системы. Один из подходов к решению задачи синтеза управления объектами в условиях неопределенности заключается в применении систем с переменной структурой (СПС). Принцип переменности структуры был предложен и исследован в работах С. В. Емельянова, В. И. Уткина и др. [1, 2].

Обычно управление с переменной структурой в СПС строится в следующем виде [1]:

$$U = \begin{cases} u^+, & s > 0 \\ u^-, & s < 0, \end{cases} \quad (1)$$
$$s = f(x_1, \dots, x_n),$$

где  $s = 0$  — уравнение линии (поверхности) переключения, построенной в пространстве состояний

системы с фазовыми координатами  $x_1, \dots, x_n$ . Поверхность переключения задается на этапе проектирования системы. Условие существования скользящего режима задается в виде [1]:

$$s \cdot \dot{s} < 0. \quad (2)$$

Управление с переменной структурой вида (1) является разрывным управлением с обратной связью. Для его реализации, как правило, применяются релейные переключающие элементы. Отметим, что традиционные системы управления с переменной структурой обладают определенными недостатками. В частности, управляющий сигнал в системе обычно представляет собой по форме двуполярный меандр с высокой (теоретически, с бесконечной) частотой переключения полярности. Двуполярность сигнала приводит к повышенному энергопотреблению. Еще один очевидный недостаток традиционных СПС — невысокое быстродействие вследствие настройки параметров поверхности переключения на случай “наихудших” условий функционирования системы. Для преодоления этих недостатков в работе предлагаются новые алгоритмы и системы управления с переменной структурой: с парными и нелинейно деформируемыми поверхностями переключения.

## 1. УПРАВЛЕНИЕ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И ПАРНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Как было отмечено, традиционные СПС обладают повышенным энергопотреблением в скользящем режиме. Полезная составляющая управления (эквивалентное управление) при двуполярном сигнале мала.



Далее предлагается возможный способ синтеза систем управления с переменной структурой, позволяющий снизить затраты на управление с сохранением качества переходных процессов [3, 4]. Сущность подхода заключается в следующем. В пространстве состояний системы строятся две поверхности переключения, образующие узкий сектор. Это можно интерпретировать как “расщепление” поверхности переключения  $s = 0$  в уравнении (1) с сохранением условия (2) на одной из полученных поверхностей. Внутри сектора управление полагается равным нулю, а вне сектора определяется аналогично традиционным СПС:

$$U = \begin{cases} u^+(x), & x \in S^+ \\ 0, & x \in S^0 \\ u^-(x), & x \in S^- \end{cases} \quad (3)$$

где  $S^+$ ,  $S^0$ ,  $S^-$  — области фазового пространства, на границах которых происходит скачкообразное изменение управляющего воздействия. При  $x \in S^0$  в системе имеет место свободное движение, приводящее изображающую точку системы на одну из поверхностей переключения, причем на этой поверхности сохраняется условие (2) существования скользящего режима. Подчеркнем, что в отличие от традиционной СПС управляющий сигнал в скользящем режиме становится однополярным, и, как следует из физических соображений, значение полезной составляющей управления (эквивалентного управления) значительно возрастает.

В качестве простого примера реализации предлагаемого подхода к построению СПС с парными поверхностями переключения рассмотрим задачу управления исполнительным приводом манипуляционного робота. Исполнительный электропривод степени подвижности манипулятора приближенно можно описать системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \omega \\ \dot{\omega} = \left[ \left( U - M(t) \frac{R_{я}}{K_{y} K_{M}} \right) K - \omega \right] \frac{1}{T}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\omega$  — угловая координата и скорость ее изменения,  $M$  и  $T$  — внешний момент нагрузки и эквивалентная постоянная времени,  $U$  — управление. Предполагается, что  $|M(t)| \leq K_{y} K_{M} / R_{я} - \Delta$ ,  $\Delta > 0$ . Для определенности будем считать, что входное воздействие  $g(t) = \text{const}$ . Параметры в системе уравнений (4) имеют следующие значения: сопротивление якорной цепи  $R_{я} = 0,8$  Ом, коэффициент усиления  $K_{y} = 280$ , коэффициент пропорциональности  $K = 50$ , моментный коэффициент  $K_{M} = 0,02$ ,

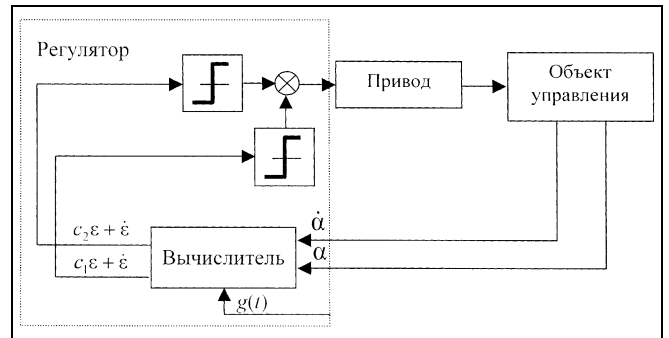


Рис. 1. Структурная схема системы управления приводом с парными линиями переключения

эквивалентная постоянная времени  $T = T(t)$  изменяется в диапазоне  $0,1 \dots 2$ . Конкретизируя условие (3), построим управление в следующей форме:

$$U = \begin{cases} 0, & s_1 s_2 < 0, \\ \text{sign}(s_2), & s_1 s_2 > 0, \end{cases} \quad (5)$$

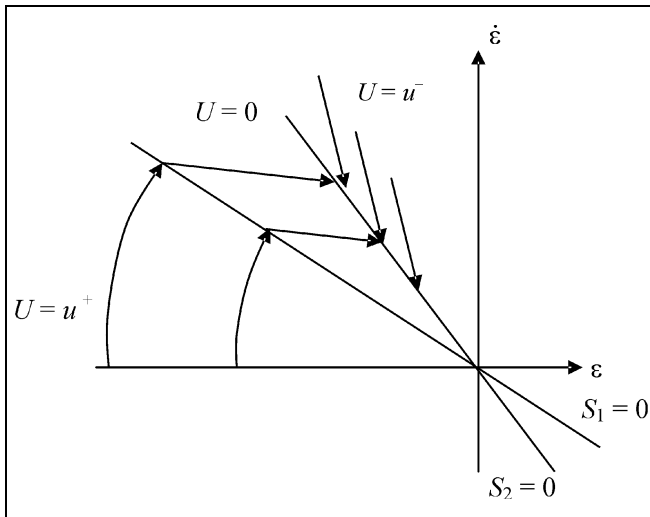
$$\begin{cases} s_1 = c_1 \epsilon + \dot{\epsilon}, \\ s_2 = (c_1 + \delta c) \epsilon + \dot{\epsilon}, \end{cases}$$

где  $\delta c$  — малая величина,  $\epsilon$  — рассогласование системы. Закон управления (5) реализуется следующим образом:

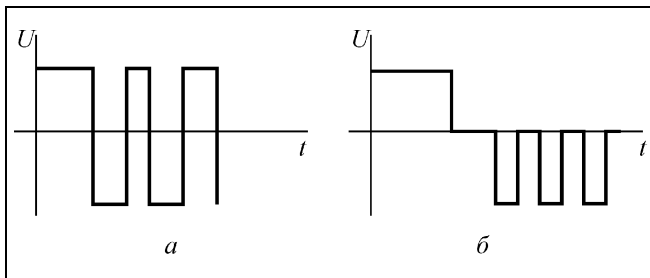
$$U = k_u (\text{sign} s_1 + \text{sign} s_2), \quad (6)$$

где  $k_u$  — постоянный коэффициент, значение которого принимается равным  $0,5$ . Структурная схема системы управления изображена на рис. 1. Объектом управления в данном случае является одно из звеньев манипулятора. Регулятор имеет достаточно простую структуру: в качестве входных переменных используются выходные координаты: угол  $\alpha$  и скорость его изменения  $\dot{\alpha}$ , а также входное воздействие  $g = g(t)$ . В вычислительном блоке регулятора рассчитываются значения  $s_1$  и  $s_2$ , на основании которых вычисляется управление  $U$ . На рис. 2 приведены фазовые траектории синтезированной СПС с парными линиями переключения. Видно, что в начальный момент времени  $U = u^+$  и движение происходит в секторе  $S^+$ . После попадания на линию  $S_1 = 0$  изображающая точка прошивает эту линию, после чего имеет место переключение управляющего сигнала до уровня  $U = 0$ , приводящее систему в режим свободного движения в области  $S^0$ . После попадания точки на линию  $S_2 = 0$  система переходит в скользящий режим.

Для проверки эффективности предложенного закона управления (5), (6) были проведены численные эксперименты на основе более полной (в срав-



**Рис. 2. Фазовые траектории СПС с парными линиями переключения**



**Рис. 3. Управляющий сигнал в СПС:**

*a* — традиционная СПС; *б* — СПС с парными линиями переключения

нении с моделью (4)) модели трехзвенного манипулятора UMS-2 [5], учитывающей взаимные влияния степеней подвижности, возможность изменения массы груза и др. Временные диаграммы управляющего сигнала для предложенной и традиционной СПС приведены на рис. 3. Как подтверждают результаты моделирования, вид переходных процессов предложенной СПС сохраняется таким же, как и в традиционных, однако затраты на управление сокращаются (на фазе скольжения — в 2...5 раз) вследствие замены двуполярного управляющего сигнала на однополярный.

## 2. СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ СПС С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Невысокое быстродействие традиционных СПС связано с неполным использованием ресурсов управления. Один из возможных способов улучше-

ния быстродействия состоит в применении адаптивного подхода. В работе [6] на основе развития результатов, изложенных в монографии [1], предложен механизм адаптации, который геометрически можно интерпретировать как поворот линии скольжения в область более высоких скоростей с сохранением условия скольжения (2). В качестве “индикатора” скользящего режима использовался так называемый параметр скольжения  $\mu$  [1, 2]. Ниже предлагается подход, обобщающий упомянутый механизм адаптации [6] и использующий нелинейные настраиваемые поверхности переключения (скольжения). Его идея заключается в следующем. В начальный момент времени поверхность переключения в пространстве состояний располагается таким образом, чтобы для нее при любых начальных условиях и возможном диапазоне изменений неопределенных параметров выполнялось условие скольжения (2). Уравнение поверхности выбирается в виде  $s = f(x, p)$ , где  $x$  — вектор выходных координат системы,  $p$  — вектор параметров поверхности переключения. Функция  $f(x, p)$  в общем случае может быть нелинейной. После попадания на поверхность переключения начинается процесс адаптивной настройки параметров  $p$  поверхности, который геометрически можно интерпретировать как ее деформацию. Алгоритм настройки следует выбрать таким образом, чтобы указанная поверхность в результате деформации смещалась в область более высоких скоростей. Как и в алгоритме, предложенном в работе [6], степень деформации определяется близостью параметра скольжения к заданному эталонному значению  $\mu_d$ . Эта идея может быть реализована различными способами. В качестве примера рассмотрим СПС второго порядка, в которой уравнение поверхности выбрано в виде

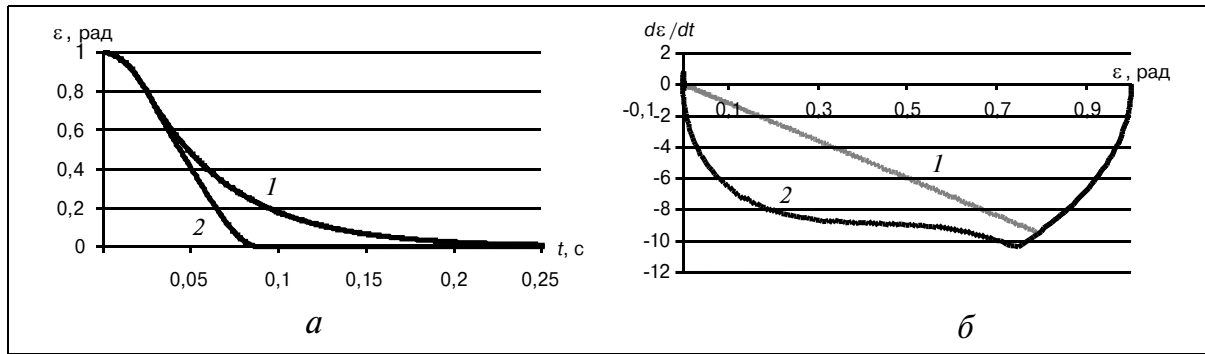
$$s = \dot{\varepsilon} + k_\varepsilon \operatorname{sign} \varepsilon \cdot \sqrt{|\varepsilon|} + c\varepsilon, \quad (7)$$

где  $k_\varepsilon$  и  $c$  — параметры, настройка которых ведет к нестационарности поверхности переключения. В частном случае, если положить  $k_\varepsilon = 0$ , уравнение (7) задает классическую прямую скольжения с параметром  $c$ , значение которого определяет наклон линии переключения [1, 2, 6]. В случае, когда  $c = 0$ , уравнение (7) описывает линию, аналогичную кривой переключения в оптимальной по быстродействию системе. В общем случае возможна одновременная настройка всех параметров поверхности.

В процессе исследования выбирались следующие законы адаптации [4–6]:

- интегральный

$$\begin{cases} \dot{k}_\varepsilon = k_\mu(\mu_d - \mu), \\ \dot{c} = k_c(\mu_d - \mu); \end{cases}$$



**Рис. 4. Переходные процессы (а) и фазовые траектории (б) системы управления степенью подвижности манипулятора: 1 — без адаптации; 2 — с адаптацией**

- интегрально-знаковый

$$\begin{cases} \dot{k}_\varepsilon = k_\mu \text{sign}(\mu_d - \mu) \\ \dot{c} = k_c \text{sign}(\mu_d - \mu); \end{cases}$$

- с огрублением по параметру скольжения

$$\dot{k}_\varepsilon = \begin{cases} k_\mu(\mu_d - \mu), & |\mu_d - \mu| \geq \varepsilon_\mu \\ 0, & |\mu_d - \mu| < \varepsilon_\mu; \end{cases}$$

$$\dot{c} = \begin{cases} k_c(\mu_d - \mu), & |\mu_d - \mu| \geq \varepsilon_\mu \\ 0, & |\mu_d - \mu| < \varepsilon_\mu; \end{cases}$$

- с огрублением по ошибке

$$\dot{k}_\varepsilon = \begin{cases} k_\mu(\mu_d - \mu), & |\varepsilon| \geq \Delta \\ 0, & |\varepsilon| < \Delta; \end{cases} \quad \dot{c} = \begin{cases} k_c(\mu_d - \mu), & |\varepsilon| \geq \Delta \\ 0, & |\varepsilon| < \Delta. \end{cases}$$

где  $k_\mu$  и  $k_c$  — коэффициенты пропорциональности,  $\mu$  и  $\mu_d$  — текущее и эталонное значения параметра скольжения,  $\varepsilon_\mu$  — минимальное рассогласование между эталонным и текущим значениями параметра скольжения,  $\Delta$  — значение рассогласования системы, при котором следует прекратить адаптивную настройку.

На рис. 4 приведены некоторые результаты численных экспериментов (временные диаграммы переходных процессов и фазовые траектории) в адаптивных СПС и традиционных СПС без адаптации. Использование адаптивной деформации позволяет увеличить быстродействие СПС примерно в 2,5 раза (для приведенных выше значений параметров системы).

Идея нелинейной деформации легко объединяется с предложенным принципом парности поверхностей переключения, что позволяет выделить еще один класс адаптивных СПС: системы с парными деформируемыми поверхностями переключения [7]. Численные эксперименты подтверждают преимущества совместного использования парных и деформируемых поверхностей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложены новые классы СПС: с парными поверхностями переключения, деформируемыми поверхностями, а также системы, в которых применяются оба эти принципа. На примере простых адаптивных СПС предложенных классов показана перспективность развиваемого подхода. Синтезированные алгоритмы управления позволяют значительно улучшить характеристики системы, в частности, снизить энергопотребление и увеличить быстродействие системы в условиях неопределенности параметров управляемого объекта. Дальнейшие исследования ведутся в направлении обобщения предложенных подходов на системы более высокого порядка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С. В. Емельянова. — М.: Наука, 1970. — 592 с.
2. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. — М.: Наука, 1981. — 368 с.
3. Дыда А. А., Маркин В. Е. Адаптивная система управления с переменной структурой. Патент РФ № 2210170 // БИ. — 2003. — № 22.
4. Дыда А. А., Маркин В. Е. Адаптивная система управления с переменной структурой. Патент РФ № 2210799 // БИ. — 2003. — № 23.
5. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. — М.: Наука, 1985. — 384 с.
6. Dyda A. A. Design of Adaptive VSS algorithms for Robot Manipulator Controls // Proc. Of First Asia Control Conference. Tokyo, July 27–30, 1994. — P. 1077–1080.
7. Маркин В. Е., Дыда А. А. Адаптивное управление с переменной структурой с парными и нелинейными деформируемыми поверхностями переключения // Информатика и системы управления. — 2003. — № 1 (5). — С. 100–105.

☎ (4232) 51-52-19

E-mail: adyda@mail.ru, markinve@iacp.dvo.ru

