

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ГАРАНТИЕЙ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ¹

Фуртат И. Б.², Гуцин П. А.³, Нгуен Б. Х.⁴, Колесник Н. С.⁵
(Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

Приведена модификация классического алгоритма адаптивного управления по выходу с целью гарантии нахождения выходного сигнала в заданном разработчиком множестве в любой момент времени. В отличие от классических схем адаптивного управления, где нельзя повлиять на качество переходного процесса, качество регулирования в установившемся режиме и время переходного процесса, здесь для решения данных проблем предлагается дополнить классическую процедуру адаптивного управления нелинейным законом управления. Нелинейный закон управления базируется на взаимнообратном преобразовании выходной переменной так, чтобы задача с ограничениями свелась к задаче без ограничений. Для преобразованной системы без ограничений можно применять любые существующие схемы адаптивного управления для ее стабилизации. Причем в новых координатах не требуется гарантировать заданное качество переходных процессов в любой момент времени и не важна величина предельной ошибки. Это связано с тем, что обратные преобразования всегда будут гарантировать нахождение исходных сигналов в заданных разработчиком ограничениях. Решена задача для объектов с единичной относительной степенью дабы избежать громоздких выводов. Однако все полученные результаты могут быть непосредственно распространены на объекты с произвольной относительной степенью. Приведен пример, иллюстрирующий эффективность предложенного метода и подтверждающий теоретические выводы.

Ключевые слова: динамическая система, адаптивное управление, нелинейное управление, замена координат, устойчивость, управление.

1. Введение

Методы адаптивного управления хорошо зарекомендовали себя в задачах управления с параметрической неопределенностью и внешними возмущениями. Несмотря на то, что первые задачи по адаптивному управлению были поставлены еще

¹ Результаты получены при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-79-10104-П.

² Игорь Борисович Фуртат, д.т.н., профессор (cainenash@mail.ru).

³ Павел Александрович Гуцин, к.т.н. (guschin.p@mail.ru).

⁴ Ба Хю Нгуен, аспирант (leningrat206@gmail.com).

⁵ Никита Сергеевич Колесник, аспирант (nik.kolesnik.1998@mail.ru).

в 50-х годах XX века, до сих пор публикуется множество различных схем адаптивного управления, что подтверждает интерес к данным задачам.

Часто цель адаптивного управления состоит в стабилизации выходной переменной объекта в заданном множестве в асимптотике или за конечное время [2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 20]. При этом оценки для расчета характеристик предельного множества и времени переходного процесса либо достаточно грубы, либо остаются в терминах существования. До сих пор нет результатов по адаптивному управлению с обеспечением требуемого качества переходных процессов. Ранее были предложены методы нелинейного управления [4, 13] с гарантией нахождения выходных переменных в заданных множествах. Однако данные методы применимы в условиях известных параметров объекта. В настоящей статье результаты [4, 13] будут обобщены на адаптивное управление объектами с параметрической неопределенностью.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 ставится задача адаптивного управления с ограничениями на выходную переменную. В частности, ограничения могут влиять на качество переходных процессов и процессов в установившемся режиме, а также ограничениями можно задать время переходного процесса. В разделе 3 предложен метод решения, включающий в себя методы классического адаптивного управления [2, 3, 16, 17] и метод, гарантирующий нахождение выходных сигналов в заданном множестве [4, 13]. В разделе 4 рассмотрен пример моделирования, иллюстрирующий теоретические результаты и подтверждающий сделанные выводы.

2. Постановка задачи

Рассмотрим динамическую систему

$$(1) \quad Q(p)y(t) = R(p)u(t) + f(t),$$

где $t \geq 0$, $u \in \mathbb{R}$, – сигнал управления; $y \in \mathbb{R}$ – выходной сигнал, доступный измерению; $f \in \mathbb{R}$ – ограниченное возмущение;

$Q(p)$ и $R(p)$ – линейные дифференциальные операторы с постоянными неизвестными коэффициентами и порядками n и $n - 1$ соответственно, $R(\lambda)$ – гурвицевый полином, где λ – комплексная переменная, $p = d/dt$.

Требуется разработать закон управления, который обеспечит нахождение выходного сигнала объекта $y(t)$ в следующем множестве:

$$(2) \quad \mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R} : \underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t)\} \text{ для любых } t \geq 0,$$

где $\underline{g}(t)$ и $\bar{g}(t)$ – ограниченные функции вместе со своими первыми производными по времени. Данные функции выбираются разработчиком исходя из требований работы системы. Например (см. рис. 1), можно гарантировать переходные процессы в заданной трубке, границы которой монотонно сходятся к окрестности нуля за заданное время T , в то время как в [2, 3, 16, 17] нельзя гарантировать заданное качество переходных процессов, заданную окрестность в установившемся режиме и заданное время переходного процесса. Сказанное будет наглядно продемонстрировано в примере в конце статьи.

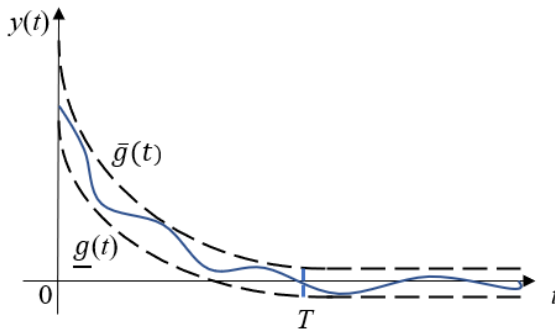


Рис. 1. Частная иллюстрация цели управления

Замечание 1. В постановке задачи рассматривается объект (1) с единичной относительной степенью ($\deg Q(p) - \deg R(p) = 1$). Такие объекты часто исследуются в литературе [1, 10, 16, 21] и могут описывать процесс заполнения жидкости в наливных танках [15], динамику трансмиссии в меха-

нической коробке передач [19], динамику колебательных систем [5] и т.д. Важно, что для таких объектов различными методами управления (метод непосредственной компенсации, метод скоростного градиента [2, 3, 16, 17] и т.п.) можно получить одну и ту же структуру закона адаптивного управления. Для объекта же с относительной степенью больше единицы различные подходы приводят к совершенно различным алгоритмам управления [2]. Поэтому в статье акцентировано внимание на объекте с единичной относительной степенью, чтобы продемонстрировать применение единой структуры адаптивного управления для решения задачи с гарантией заданного качества. Однако, как будет видно из полученных результатов, решение легко может быть обобщено на задачи управления с относительной степенью больше единицы, в частности, с использованием метода расширенной ошибки, алгоритмов адаптации высокого порядка, метод бэкстеппинга [2] и т.д., где в каждом отдельном случае будут получены различные алгоритмы управления.

3. Метод решения

Согласно [2, 16, 17], перепишем выражение (1) в виде

$$(3) \quad y(t) = \frac{k_m}{p+a} \left[u(t) + \frac{N_1(p)}{M(p)} u(t) + \frac{N_2(p)}{M(p)} y(t) + ky(t) + \frac{\theta}{M(p)} f(t) + \epsilon(t) \right],$$

где $k_m > 0$, $a > 0$ и θ – известные коэффициенты; $M(\lambda)$ известный гурвицевый полином порядка $n - 1$; $N_1(p)$ и $N_2(p)$ – линейные дифференциальные операторы порядков $n - 2$ каждый и с неизвестными коэффициентами; k неизвестный параметр; $\epsilon(t)$ – экспоненциально затухающая функция, обусловленная ненулевыми начальными условиями (1).

Обозначим

$$N_1(p) = [c_{1,0}, c_{1,1}, \dots, c_{1,n-2}] [1, p, \dots, p^{n-2}]^\top,$$

$$N_2(p) = [c_{2,0}, c_{2,1}, \dots, c_{2,n-2}] [1, p, \dots, p^{n-2}]^\top,$$

$$c_0 = -[c_{1,0}, c_{1,1}, \dots, c_{1,n-2}, c_{2,0}, c_{2,1}, \dots, c_{2,n-2}, k],$$

$$w(t) = \text{col}\{V_u(t), V_y(t), y(t)\},$$

где c_0 – вектор постоянных неизвестных параметров; $\bar{f}(t) = \frac{\theta}{M(p)}f(t)$ – новое ограниченное возмущение в силу ограниченности исходной функции $f(t)$ и гурвицевости полинома $M(\lambda)$; $w(t)$ – вектор регрессии, составленный с помощью следующих фильтров:

$$(4) \quad \begin{aligned} \dot{V}_u(t) &= FV_u(t) + bu(t), V_u(0) = 0, \\ \dot{V}_y(t) &= FV_y(t) + by(t), V_y(0) = 0. \end{aligned}$$

Здесь $V_u, V_y \in \mathbb{R}^{n-1}$, F – матрица в форме Фробениуса с характеристическим многочленом $M(\lambda)$, $b = [0, 0, \dots, 1]^T$.

Учитывая введенные обозначения, перепишем (3) как

$$(5) \quad \dot{y}(t) = -ay(t) + k_m [u(t) - c_0^T w(t) + \bar{f}(t) + \epsilon(t)].$$

Согласно [4, 13], для решения задачи управления с заданными ограничениями введем замену выходной переменной y в виде

$$(6) \quad y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t),$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}$ – непрерывно-дифференцируемая функция по t , $\Phi(\varepsilon, t)$ удовлетворяет следующим условиям:

а) $\underline{g}(t) < \Phi(\varepsilon, t) < \bar{g}(t)$ для любых $t \geq 0$ и $\varepsilon \in \mathbb{R}$;

б) существует обратное отображение $\varepsilon = \Phi^{-1}(y, t)$ для любых $y \in \mathcal{Y}$ и $t \geq 0$;

в) функция $\Phi(\varepsilon, t)$ непрерывно-дифференцируемая по ε и t , а также $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \neq 0$ для любых $y \in \mathcal{Y}$ и $t \geq 0$;

г) функция $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}$ ограничена по $t \geq 0$ для любых $\varepsilon \in \mathbb{R}$.

Теперь определим динамику по переменной ε для исследования устойчивости замкнутой системы. Для этого найдем полную производную по времени от (6) в виде

$$\dot{y} = \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}.$$

Так как $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \neq 0$ (см. условие (в)), то, принимая во внимание (5), перепишем последнее равенство как

$$(7) \quad \dot{\varepsilon}(t) = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left(-ay(t) + k_m [u(t) - c_0^T w(t) + \bar{f}(t) + \epsilon(t)] - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right).$$

То есть с помощью преобразования координат (6) исходная задача с ограничениями сведена к задаче без ограничений. Теперь необходимо синтезировать закон управления u , обеспечивающий устойчивость по вход-состоянию системы (7).

Зададим закон управления в виде

$$(8) \quad \begin{aligned} u(t) &= u_1(t) + u_2(t), \\ u_1(t) &= c^\top(t)w(t), \\ u_2(t) &= \frac{1}{k_m} \left[ay(t) + \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} - \alpha \varepsilon(t) \right]. \end{aligned}$$

Здесь $u_1(t)$ – закон адаптивного управления; $u_2(t)$ – закон управления, гарантирующий нахождение $y(t)$ в множестве (2); $c(t)$ – вектор настраиваемых параметров; $\alpha > 0$.

Подставив (8) в (7), получим

$$(9) \quad \dot{\varepsilon} = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \times \\ \times [-\alpha \varepsilon + k_m(c(t) - c_0)^\top w(t) + k_m \bar{f}(t) + k_m \varepsilon(t)].$$

Теорема 1. Пусть для преобразования (5) выполнены условия а)–з), $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} > 0$ для любых ε и t , а также $\sup_t \left\{ \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right\} < \infty$. Тогда для любых $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $\gamma > 0$ закон управления (7) вместе с алгоритмом адаптации

$$(10) \quad \dot{c}(t) = -\beta \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \varepsilon(t)w(t) - \gamma c(t)$$

обеспечивает принадлежность выходной переменной $y(t)$ множеству (2).

Замечание 2. Рассмотрим отличия классического адаптивного закона управления [2, 3, 16, 17] от предложенного. Классический вид адаптивного закона управления выглядит как

$$(11) \quad \begin{aligned} u(t) &= u_1(t) = c^\top(t)w(t), \\ \dot{c}(t) &= -\beta y(t)w(t) - \gamma c(t). \end{aligned}$$

Из (8) следует, что предложенный закон управления состоит из классического u_1 , необходимого для компенсации параметрической неопределенности, и нелинейного u_2 – для гарантии нахождения y в множестве (2). Дополнительно алгоритм адаптации (10), в отличие от классического (11), содержит нелинейный коэффициент усиления $\left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1}$ и переменную ε вместо y , поскольку стабилизируется система (9) вместо (5).

Доказательство. Для анализа устойчивости замкнутой системы зададим функцию Ляпунова вида

$$(12) \quad V = \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{k_m}{2\beta}(c - c_0)^\top(c - c_0) + \chi \int_t^\infty \varepsilon^2(s)ds,$$

где $\chi > 0$. Найдя полную производную от (12) по времени вдоль траекторий (8) и (10), получим

$$(13) \quad \dot{V} = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left[-\alpha \varepsilon^2 + k_m \varepsilon \bar{f}(t) + k_m \varepsilon(t) \varepsilon(t) \right] - \frac{k_m \gamma}{\beta} c^\top(c - c_0) - \chi \varepsilon^2(t).$$

Воспользуемся следующими соотношениями:

$$(14) \quad \begin{aligned} \varepsilon \bar{f} &\leq 0,5 \left[\frac{1}{\mu} \varepsilon^2 + \mu \bar{f}^2 \right], \\ \varepsilon \varepsilon &\leq 0,5 \left[\frac{1}{\mu} \varepsilon^2 + \mu \varepsilon^2 \right], \\ -c^\top(c - c_0) &= -0,5[(c - c_0)^\top(c - c_0) + c^\top c - c_0^\top c_0]. \end{aligned}$$

С учетом (14), перепишем (13) как

$$(15) \quad \begin{aligned} \dot{V} &\leq - \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} (\alpha - k_m \mu^{-1}) \varepsilon^2 - \\ &\quad - \frac{k_m \gamma}{2\beta} [(c - c_0)^\top(c - c_0) + c^\top c] - \\ &\quad - (\chi - 0,5 k_m \mu) \varepsilon^2(t) + \\ &\quad + \frac{\gamma}{2\beta} c_0^\top c_0 + 0,5 k_m \mu \sup\{\bar{f}\}^2. \end{aligned}$$

Из (15) следует, что при выполнении условий

$$(16) \quad \begin{aligned} |\varepsilon| &> \sqrt{\frac{\mu(\gamma c_0^\top c_0 + k_m \beta \mu \sup\{\bar{f}\}^2)}{2\beta(\alpha \mu - k_m)}} \sup_t \left\{ \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right\}, \\ \alpha &> \frac{k_m}{\mu}, \\ \chi &> 0,5 k_m \mu, \end{aligned}$$

имеем $\dot{V} < 0$. При этом из (16) видно, что всегда существуют α , μ и χ , обеспечивающие $\dot{V} < 0$. Из условия б) следует, что преобразование (6) гарантирует выполнение условия (2). Теорема доказана.

Замечание 3. Из (16) видно, что при уменьшении значения γ и при увеличении значения α можно уменьшить предельное значение по $|\varepsilon|$. В свою очередь, из условий б) и г) следует, что преобразование (6) является строгой монотонной функцией. Значит, с уменьшением предельного значения $|\varepsilon|$ в перделе уменьшается колебательность по переменной y в множестве (2).

4. Пример

Рассмотрим объект управления (1) с различными коэффициентами в операторах $Q(p)$ и $R(p)$:

а) $Q(p) = (p - 1)^3$ и $R(p) = (p + 1)^2$,

б) $Q(p) = p^3 - 5p^2 + 3p - 1$ и $R(p) = 0,5(p + 1)^2$,

с) $Q(p) = p^3 + 5p^2 - 7p + 5$ и $R(p) = 0,5(p + 1)^2$,

начальными условиями $p^2y(0) = py(0) = y(0) = 4$ и возмущением

$$f(t) = 5 + 5 \sin(1,5t) + 3 \cos(0,8t) + d(t),$$

где $d(t) = \text{sat}\{\hat{d}(t)\}$, $\text{sat}\{\cdot\}$ – функция насыщения, $\hat{d}(t)$ – белый шум, моделируемый в Matlab Simulink с помощью блока «Band-Limited White Noise» с мощностью шума 1 и периодом дискретизации 0,1.

Сформируем алгоритм управления. Преобразование координат (6) зададим в виде

$$\Phi(\varepsilon, t) = \frac{\bar{g}(t)e^\varepsilon + \underline{g}(t)}{e^\varepsilon + 1}.$$

Качество управления определим функциями

$$\bar{g}(t) = 4e^{-3t} + 0,1,$$

$$\underline{g}(t) = 3,8e^{-3t} - 0,1.$$

Зададим в фильтрах (4)

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}.$$

В законе управления (7) зададим $\alpha = 1$, $a = 1$ и $k_m = 1$.

В алгоритме адаптации (14) зададим $\beta = 1$ и $\gamma = 1$.

Сравним предложенный алгоритм управления с адаптивным управлением [2, 3, 16, 17], представленным в виде (11). Выберем в данном адаптивном алгоритме те же параметры, что и в предложенном алгоритме.

На рис. 3 приведены результаты переходных процессов для алгоритма [2, 3, 16, 17] (пунктирные линии) и предложенного закона управления при параметрах а), б) и с) (сплошные линии); внизу пунктирными линиями изображены графики функций $\bar{g}(t)$ и $\underline{g}(t)$, задающие качество переходных процессов, и сплошными линиями – графики выходных сигналов с предложенным адаптивным законом управления

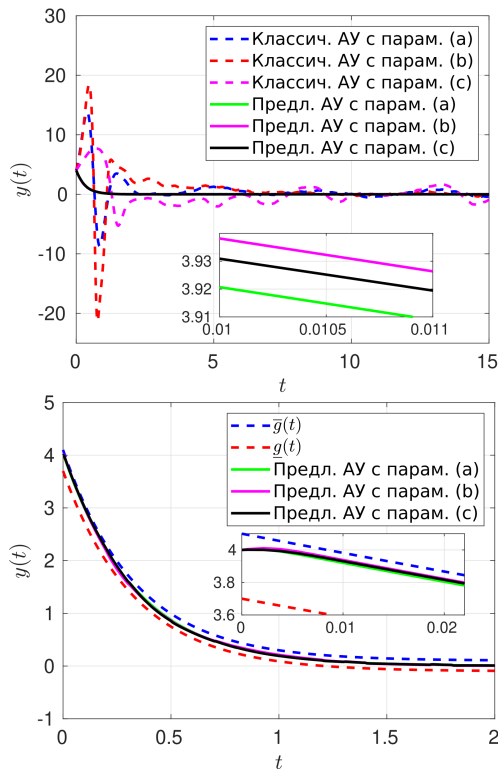


Рис. 2. Вверху: переходные процессы для классического адаптивного управления и предложенного адаптивного алгоритма (сплошные линии). Внизу: графики функций $\bar{g}(t)$ и $\underline{g}(t)$ и графики выходных сигналов с предложенным адаптивным законом управления

Достоинство предложенного алгоритма, в отличие от [2, 3, 16, 17], очевидно: переходные процессы всегда содержатся в трубке (2), границами которой можно задать качество переходных процессов. Так, полученные процессы почти экспоненциально затухают в предельное множество $(-0,1; 0,1)$ за время 1,5 с, в то время как алгоритмы [2, 3, 16, 17] неконтролируемы в плане переходного процесса и времени переходного процесса, а также невозможно априори определить качество выходной переменной в установившемся режиме.

Замечание 4. Предлагаемый метод напрямую зависит от начальных условий объекта. Если $y(0)$ не принадлежит заданному множеству, то предлагаемый метод неприменим, поскольку из преобразования (6) сигнал $y(t)$ должен быть определен внутри заданного множества в любой момент времени. Указанный выше недостаток можно устранить путем добавления к ограничивающим функциям аддитивной быстрой экспоненциально затухающей функции так, чтобы новые ограничения охватывали начальные условия. На рис. 3 показан переходной процесс по $y(t)$ при $y(0) = 1$, не принадлежащем исходному множеству \mathcal{Y} .

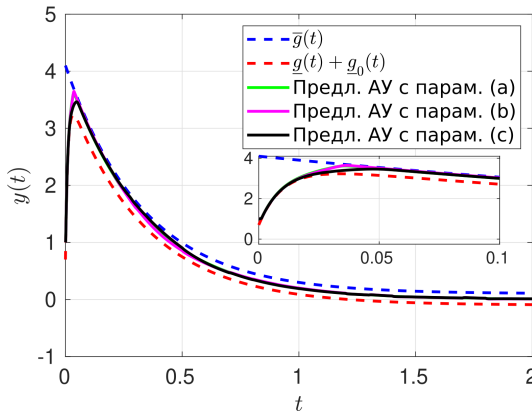


Рис. 3. Переходные процессы для предложенного адаптивного алгоритма (сплошные линии) при $y(0) = 1$. Пунктирными линиями изображены графики функций $\bar{g}(t)$ и $\underline{g}(t) + \underline{g}_0(t)$, задающие качество переходных процессов

При этом к нижней ограниченной функции $\underline{g}(t)$ добавлена составляющая

$$\underline{g}_0(t) = -3e^{-100t},$$

чтобы начальное условие $y(0)$ было ограничено снизу новой функцией ограничения $\underline{g}(t)$.

5. Заключение

В статье применены методы классического адаптивного управления [2, 3, 16, 17] и метод нелинейного управления [4, 13], которые позволили создать новый метод адаптивного управления, гарантирующий заданную качество переходных процессов. Вначале используется метод [4, 13], позволяющий преобразовать задачу с ограничениями к задаче без ограничений. Затем применяется классический метод адаптивного управления [2, 3, 16, 17]. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и показали, что в классических схемах адаптивного управления при различных параметрах объекта наблюдаются существенно разные неконтролируемые переходные процессы, в то время как в новой схеме управления при тех же параметрах гарантируется почти заданное качество переходных процессов.

Литература

1. ЕРЕМИН Е.Л. *Алгоритм адаптивной системы управления с явно-эталонной моделью для строго минимально-фазового объекта* // Информатика и системы управления. – 2004. – №2, Т. 8. – С. 157–166.
2. МИРОШНИК И.В., НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. – СПб.: Наука, 2000.
3. ФРАДКОВ А.Л. *Кибернетическая физика: принципы и примеры*. – СПб.: Наука, 2003.
4. ФУРТАТ И.Б., ГУЩИН П.А. *Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала*

- ла в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. – 2021. – №4. – С. 121–139.
5. ХАЛИЛ Х.К. *Нелинейные системы*. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009.
 6. ANDERSON B.D.O. *Adaptive systems, lack of persistency of excitation and bursting phenomena* // Automatica. – 1985. – Vol. 21, No. 3. – P. 247–258.
 7. ANNASWAMY A.M., SKANTZE F.P., LOH A.-P. *Adaptive control of continuous time systems with convex/concave parametrization* // Automatica. – 1998. – Vol. 34, No. 1. – P. 33–49.
 8. ARSLAN G., BASAR T. *Disturbance attenuating controller design for strict-feedback systems with structurally unknown dynamics* // Automatica. – 2001. – Vol. 37, No. 8. – P. 1175–1188.
 9. CAMPION G., BASTIN G. *Analysis of an adaptive controller for manipulators: Robustness versus flexibility* // Systems & Control Letters. – 1989. – Vol. 12, No. 3. – P. 251–258.
 10. CHOPRA N., SPONG M.W. *Output Synchronization of Nonlinear Systems with Relative Degree One* // Recent Advances in Learning and Control. – Springer, London, 2008. – Vol. 371. – P. 51–64.
 11. FARZA M., M'SAAD M., MAATOUG T., KAMOUN M. *Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems* // Automatica. – 2009. – Vol. 45, No. 10. – P. 2292–2299.
 12. FURTAT I.B. *Robust Synchronization of the Structural Uncertainty Nonlinear Network with Delay and Disturbances* // IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline), 11th IFAC Int. Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, ALCOSP–2013. – 2013. – P. 227–232.
 13. FURTAT I., GUSHCHIN P. *Nonlinear feedback control providing plant output in given set* // Int. Journal of Control. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>.

14. GOODWIN G.C., MAYNE D.Q. *A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control* // Automatica. – 1987. – Vol. 23, No. 1. – P. 57–70.
15. HASHIM Z.S., IBRAHEEM I.K. *A relative degree one modified active disturbance rejection control for four-tank level control system* // Int. Review of Applied Sciences and Engineering. – 2021. – No. 2, Vol. 8. – P. 157–166.
16. IOANNOU P.A., SUN J. *Robust Adaptive Control*. – Courier Corporation, 2012.
17. NARENDRA K.S., ANNASWAMY A.M. *Stable Adaptive Systems*. – Courier Corporation, 2012.
18. POLYCARPOU M.M., IOANNOU P.A. *A robust adaptive nonlinear control design* // Automatica. – 1996. – Vol. 32, No. 3. – P. 423–427.
19. RIFAI K.E., YOUCEF-TOUMI K. *Robust Adaptive Control of Switched system*. – InTech, Switched Systems, 2009.
20. TAO G. *Multivariable adaptive control: A survey* // Automatica. – 2014. – Vol. 50, No. 11. – P.2737–2764.
21. ZHAO G., CHEN G., MI J. *Overcoming a Fundamental Limitation of Linear Systems with Generalized First Order Reset Element* // Proc. of the 37th Chinese Control Conference (CCC). – 2018. – DOI: 10.23919/ChiCC.2018.8483381.

ADAPTIVE CONTROL WITH A GUARANTEE OF A GIVEN PERFORMANCE

Igor Furtat, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Peterburg, Dr.Sc, professor (cainenash@mail.ru).

Pavel Gushchin, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Peterburg, Cand.Sc (guschin.p@mail.ru).

Ba Huy Nguyen, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Peterburg, аспирант (leningrat206@gmail.com).

Nikita Kolesnik, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Peterburg, аспирант (nikita@gmail.com).

Abstract: The paper presents a modification of the classical output adaptive control algorithm in order to guarantee that the output signal belongs to a given set specified by the developer at any time. Unlike classical adaptive control schemes, where it is impossible to influence control performances, including transient and steady-state performance, it is proposed here to supplement the classical adaptive control procedure with a nonlinear control law to solve these problems. The nonlinear control law is based on the special coordinate transformation of the output variable so that the problem with constraints is reduced to the problem without constraints. For a transformed system without constraints, any existing adaptive control schemes can be applied to stabilize it. Moreover, in new coordinates, it is not required to guarantee the specified performance of transient processes at any time, and the value of the marginal error is not important. This is due to the fact that inverse transformations will always guarantee that the original signals are within the limits specified by the developer. The problem for plants with a relative degree one is solved in order to avoid cumbersome conclusions. However, all the results obtained can be directly extended to plants with an arbitrary relative degree. An example is given that illustrates the effectiveness of the proposed method and confirms the theoretical conclusions.

Keywords: dynamical system, change of coordinates, stability, control.

УДК 519.7

ББК Ж 50

DOI: 10.25728/ubs.2023.102.3

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Г.А. Угольницким.*

Поступила в редакцию 06.12.2022.

Дата опубликования 31.03.2023.