УДК 681.5
doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

Научные статьи
Articles

Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента

О. П. Томчина[а]***,*** *канд. техн. наук, доцент, orcid.org/ 0000-0002-6109-2143*
Д. Н. Поляхов[б]***,*** *канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-4134-0189*
О. И. Токарева[в]***,*** *доцент, orcid.org/0000-0003-4656-3151*
А. Л. Фрадков[г, д]***,*** *доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-5633-0944, fradkov@mail.ru*
[а]Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005, РФ
[б]Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ
[в]Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Двинская ул., 5/7, Санкт-Петербург, 198035, РФ
[г]Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, РФ
[д]Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Постановка проблемы: *движение многих реальных объектов описывается существенно нелинейными и нестационарными моделями. Ряд подходов к управлению такими объектами основан на построении внутренней модели нестационарности. Однако параметры модели нестационарности могут меняться в широких пределах, что может привести к дополнительным погрешностям. В данной работе предполагается лишь, что скорость изменения параметров объекта ограничена, при этом начальная неопределенность может быть достаточно велика.* ***Цель:*** *анализ алгоритмов адаптивного управления нелинейными нестационарными объектами для систем с явной эталонной моделью, синтезированных методом скоростного градиента.* ***Результаты:*** *получена оценка предельного отклонения решения замкнутой системы от решения эталонной модели. Показано, что при достаточно медленных изменениях параметров и малой начальной неопределенности предельная ошибка в системе может быть сделана сколь угодно малой. Рассмотрены системы, построенные на основе как прямого, так и идентификационного подхода. Процедура синтеза адаптивного регулятора и анализа синтезированной системы проиллюстрирована примером.* ***Практическая значимость:*** *полученные результаты позволяют строить и анализировать широкий класс адаптивных систем с эталонной моделью в нестационарных условиях.*

Ключевые слова *— адаптивная система, нелинейность, нестационарность, эталонная модель, метод скоростного градиента, прямой подход, идентификационный подход.*

Для цитирования: Томчина О. П., Поляхов Д. Н., Токарева О. И., Фрадков А. Л. Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 37–44. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44
For citation: Tomchina O. P., Polyakhov D. N., Tokareva O. I., Fradkov A. L. Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 37–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

Введение

Начиная с 1970-х годов Ленинград постепенно становился одной из мировых столиц теории адаптивных систем. Происходило это благодаря активной деятельности признанного лидера в этой области, члена-корреспондента РАН, профессора ЛГУ Владимира Андреевича Якубовича. Проведение Ленинградских симпозиумов по теории адаптивных систем в 1972, 1974, 1976, 1979 гг. и Всесоюзной конференции по теории адаптивных систем и ее применениям в 1982 г. активизировало исследования в этой области в вузах города и привлекло внимание ведущих ученых СССР к достижениям научной школы В. А. Якубовича и взаимодействующих с ней научных школ города. Эти результаты были отражены в ряде монографий [1–7]. В трудные 1990-е годы научная и публикационная активность снизились, но зато окрепли новые международные связи. К началу XXI столетия в науку об адаптивном управлении пришло поколение современных ученых, что укрепило традиции и авторитет Санкт-Петербургской научной школы [8–12]. В последние годы новых книг по адаптивному управлению появлялось мало, что может навести на мысль, что эта область исчерпана. Действительно, в отличие от конца прошлого века, в веке нынешнем доминировать в тематике автоматического управления стали сетевые и многоагентные системы [13].

Недавно, однако, стала намечаться тенденция к возрождению интереса к адаптивному управлению на основе понимания глубоких связей между адаптацией и машинным обучением. Без сомнения, машинное обучение является основой систем искусственного интеллекта. Поэтому значительная часть багажа, накопленного за несколько десятилетий, может пригодиться на новом этапе развития науки и технологий, помогая оснащать автоматические системы искусственным интеллектом.

Ничто не исключает необходимость проводить время от времени анализ и обобщение накопленных результатов, систематизировать и давать новые оценки достижениям и методам прошлых лет. Шаг в этом направлении делается и в данной статье, а именно рассматривается общая задача адаптивного управления с эталонной моделью для нестационарных нелинейных объектов. Отметим, что, хотя задачи адаптивного управления нелинейными объектами уже давно и подробно исследованы [1, 7, 8, 10, 14], задачам адаптивного управления нестационарными системами посвящено сравнительно мало работ. Например, адаптивному управлению нелинейными нестационарными системами по состоянию посвящена работа [15], а адаптивному управлению с обратной связью по выходу — работы [16–20]. Однако в работах [15–20] накладываются достаточно жесткие предположения на структуру объекта управления (ОУ) и возмущений и, кроме того, предполагается, что неизвестные параметры входят в уравнение ОУ линейно. В сложных задачах зачастую бывает, что модель ОУ параметризована нелинейно. Адаптивному управлению нелинейными системами с нелинейной параметризацией посвящены работы [21–25], однако в них неизвестные параметры предполагаются постоянными, т. е. ОУ является стационарным.

В данной статье описывается общая постановка и основанный на методе скоростного градиента [1, 7, 8] общий подход к решению задач адаптивного управления нелинейными нестационарными системами без структурных ограничений на вхождение параметров. Для определенности в работе рассматриваются адаптивные системы с явной эталонной моделью, построенные на основе прямого и идентификационного подхода в достаточно простой ситуации отсутствия возмущений и доступных для измерения состояний объекта и эталонной модели.

Важно отметить, что даже в этой ситуации нестационарность играет роль возмущения и осложняет решение задачи, препятствуя достижению асимптотической устойчивости процессов.

Адаптивное управление с эталонной моделью — прямой подход

Рассмотрим ОУ, описываемый уравнениями в пространстве состояний

$$\dot{x}(t)=F(x(t),\ u(t),\ \xi(t))+f(t);\ y(t)=Cx(t), \qquad (1)$$

и вспомогательную динамическую систему, называемую эталонной моделью (ЭМ) и описываемую уравнениями

$$\dot{x}_M(t)=F_M(x_M(t),\ r(t));\ y_M(t)=C_M x_M(t), \qquad (2)$$

где векторы x, $x_M \in R^n$ — состояния ОУ и ЭМ соответственно; u, $r \in R^m$ — векторы управления и задающего воздействия; $f \in R^m$ — вектор возмущающих воздействий; $\xi(t) \in \Xi \subset R^m$ — вектор неизвестных и меняющихся во времени параметров ОУ; y, $y_M \in R^l$ — выходы ОУ и ЭМ. Множество Ξ возможных значений ξ считается известным и ограниченным, и скорость изменения неизвестных параметров тоже считается ограниченной. Предполагается также, что решения уравнений (1), (2) существуют, при этом решения уравнений (2) — ограниченные функции времени.

Требуется определить закон адаптивного управления

$$u(t)=U(y(t),\ r(t),\ \theta(t)); \qquad (3)$$

$$\dot{\theta}(t)=\Phi(y(t),\ r(t),\ \theta(t)), \qquad (4)$$

не зависящий от $\xi(t) \in \Xi$ и использующий только величины, доступные измерению, так, чтобы движение объекта приближалось с течением времени к движению ЭМ, т. е. достигалась цель управления

$$\|x(t)-x_M(t)\| \le \varepsilon,\ \ t \ge t_a \qquad (5)$$

для $\forall\xi(t) \in \Xi$, где $\varepsilon > 0$ — заданная точность; t_a — время достижения цели. Таким образом, задача построения адаптивной системы состоит в определении функций U, Φ таких, что решения дифференциальных уравнений (1), (3), (4) существуют при всех $t > 0$ и удовлетворяют цели управления (5).

Эталонная модель выбирается таким образом, чтобы она обладала устойчивостью и заданным качеством переходных процессов. При этом ЭМ может либо быть явно реализованной в системе управления в виде отдельного динамического звена (2) (системы с явной ЭМ), либо присутствовать в системе неявно, в виде набора параметров алгоритма управления (системы с неявной ЭМ) [1, 7]. В последнем случае цель управления (5) заменяется другой, в формулировке которой не используется вектор $x_M(t)$, например:

$$\|\dot{x}(t) - F_M(x(t),\ r(t))\| < \varepsilon_1,\ \ t \ge t_a, \qquad (6)$$

где t_a — время переходного процесса относительно цели (6). Цель управления может задаваться также при помощи вспомогательной целевой функции $Q(x) \ge 0$:

$$Q(x(t) - x_M(t)) < \varepsilon,\ \ t \ge t_a \qquad (7)$$

или

$$Q(\dot{x}(t) - F_M(x(t),\ r(t)) \le \varepsilon_1,\ \ t \ge t_a. \qquad (8)$$

Часто $Q(x)$ — квадратичная функция; $Q(x) = x^{\mathrm{T}}Px$, где $P = P^{\mathrm{T}} > 0$ — некоторая положительно определенная матрица.

Переходя к синтезу адаптивного регулятора, наложим упрощающие предположения: будем считать, что измерению доступны все компоненты векторов состояния ОУ и ЭМ, а возмущениями можно пренебречь: $f(t) \equiv 0$. Кроме того, наложим традиционное предположение о структурной согласованности ОУ и ЭМ: структура основного контура системы [регулятора (3)] выбрана так, чтобы обеспечить совпадение динамики замкнутой системы и ЭМ при некоторых значениях параметров регулятора. Это значит, что для любого $\xi \in \Xi$ должен существовать вектор «идеальных» значений параметров регулятора $\theta_*(\xi)$ такой, что для любых x, r выполняется тождество

$$F(x,\ U(x,\ r,\ \theta_*(\xi)),\ \xi) = F_M(x,\ r). \qquad (9)$$

Для синтеза воспользуемся методом скоростного градиента [1, 7, 8]. Для этого вычислим скорость изменения целевой функции $Q(e) = Q(x - x_M(t))$ вдоль траектории замкнутой системы. Имеем

$$\dot{Q}(e) = \nabla Q^{\mathrm{T}}[F(x,\ U(x,\ r,\ \theta),\ \xi(t)) - F_M(x_M(t),\ r(t))] = \\ = w(x,\ \theta,\ t).$$

Вычисляя градиент от $w(x, \theta, t)$ по θ, построим регуляризованный алгоритм скоростного градиента в дифференциальной форме

$$\dot{\theta} = -\gamma\nabla_\theta w(x,\ \theta,\ t) - \alpha(\theta - \bar{\theta}), \qquad (10)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент усиления алгоритма адаптации; $\alpha > 0$ — коэффициент регуляризации; $\bar{\theta} \in \Xi$ — априорная оценка неизвестного параметра $\theta_*(\xi(t))$.

Условия достижения цели в адаптивной системе (1)–(4), (10) формулируются в следующем утверждении.

Теорема. Пусть выполнены следующие условия.

1. Функции $F(\cdot)$, $F_M(\cdot)$, $\nabla_\theta w(\cdot)$ непрерывно дифференцируемы.

2. Функция $Q(e) \ge 0$ непрерывно дифференцируема, и ее значения стремятся к $+\infty$ при $e \to +\infty$.

3. Функция $w(x, \theta, t)$ выпукла по θ.

4. Существует функция $\theta_*(\xi(t))$ такая, что для некоторого $\rho > 0$ справедливо неравенство (условие достижимости) $w(x,\ \theta_*(\xi),\ t) \le -\rho Q(e)$.

5. Выполнено условие согласованности (9), причем вектор-функция $\theta_*(\xi(t))$ ограничена во времени вместе со своей производной:

$$\|\theta_*(\xi(t))\| \le \beta_0 \ \text{ и } \ \|\mathrm{d}\theta_*(\xi(t))/\mathrm{d}t\| \le \beta_1.$$

Тогда все решения адаптивной системы (1)–(4), (10) ограничены и достигается цель управления (7) при $\varepsilon = \mu^{-1}\gamma^{-2}(\alpha^2\beta_0 + \beta_1^2)/\rho_0$, где $\rho_0 = \min\{\rho, 2\alpha - \mu\gamma\}$, $\mu > 0$ — настроечный параметр. При выборе параметра $\alpha > 0$, удовлетворяющего неравенству $\alpha < \rho/2$, оптимальный выбор $\mu = \alpha/\gamma$ дает оценку

$$\varepsilon = \beta_0/\gamma + \beta_1^2/(\gamma\alpha^2). \qquad (11)$$

Для доказательства теоремы выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(x,\ \theta,\ t) = Q(x - x_M(t)) + (2\gamma)^{-1}\|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 \qquad (12)$$

и вычислим скорость изменения $V(x(t), \theta(t), t)$ вдоль траектории системы (1)–(3), (10). Имеем

$$\dot{V}(x,\ \theta,\ t) = w(x,\ \theta,\ t) + \gamma^{-1}(\theta - \theta_*(\xi(t)))^{\mathrm{T}}[\dot{\theta} - \dot{\theta}_*(\xi(t))] = \\ = w(x,\ \theta,\ t) + (\theta - \theta_*(\xi(t)))^{\mathrm{T}} \times \\ \times[-\nabla w(x,\ \theta,\ t) - \alpha/\gamma(\theta - \bar{\theta}) - \gamma^{-1}\mathrm{d}\theta_*(\xi(t))/\mathrm{d}t].$$

Пользуясь последовательно условиями согласованности (9), выпуклости и достижимости, получим

$$\dot{V}(x,\ \theta,\ t) \le -\rho Q(e) - \alpha/\gamma\|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 - \\ - \alpha/\gamma[\theta - \theta_*(\xi(t))][\theta_*(\xi(t)) - \bar{\theta}] - \\ - \gamma^{-1}(\theta - \theta_*(\xi(t)))^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\theta_*(\xi(t))/\mathrm{d}t.$$

Далее, воспользовавшись квадратичным неравенством $|x^{\mathrm{T}}y| \le \mu/2\|x\|^2 + (2\mu)^{-1}\|y\|$, справедливым для любого $\mu > 0$, получим

$$\dot{V}(x,\ \theta,\ t) \le -\rho Q(e) - (\alpha/\gamma - \mu/2)\|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 - \\ - \mu^{-1}\gamma^{-2}[\alpha^2\|\bar{\theta} - \theta_*(\xi(t))\|^2 + \beta_1^2].$$

Наконец, выбрав $\mu < 2\alpha/\gamma$ и обозначив $\rho_0 = \min\{\rho, 2\alpha - \mu\gamma\}$, получим

$$\dot{V}(x,\ \theta,\ t) \le -\rho_0 V + \beta, \qquad (13)$$

где $\beta = \mu^{-1}\gamma^{-2}(\alpha^2 \sup\|\theta_*(\xi(t))\| + \beta_1^2)$.

Таким образом, при $V(x, \theta, t) > \beta/\rho_0$ функция V убывает, т. е. она остается ограниченной на траекториях замкнутой системы. Отсюда и из ограниченности решений уравнений ЭМ, а также ограниченности дрейфа параметров следует, что траектории замкнутой системы ограничены. Наконец, из (13) и из соотношения $Q(e) \le V(x, \theta, t)$ заключаем, что цель управления (7) достигается при $\varepsilon = \beta/\rho_0$.

Замечание 1. Зафиксировав выбор параметра регуляризации алгоритма $\alpha < \rho/2$, можно выбирать коэффициент усиления алгоритма γ сколь угодно большим. В соответствии с (11) предельная ошибка при этом будет уменьшаться, и при достаточно большом γ может быть сделана сколь угодно малой.

Замечание 2. Теорема остается справедливой, если целевая функция $Q(e)$ задана не на всем пространстве, а на некоторой открытой области Ω такой, что $Q(e) \to +\infty$ при стремлении e к границе области Ω. Это следует из того, что на поверхностях уровня $Q(e) = c$ при достаточно больших c функция V убывает, и, значит, целевая функция $Q(e)$ остается ограниченной, т. е. траектории замкнутой системы остаются внутри области Ω.

Адаптивное управление с эталонной моделью — идентификационный подход

При идентификационном подходе структура и параметры основного контура также выбираются исходя из структуры объекта в предположении, что параметры известны, и таким образом, чтобы обеспечить достижение исходной или вспомогательной цели управления. Однако при работе системы вместо параметров объекта ξ (которые на самом деле неизвестны) подставляются их оценки $\hat{\xi}(t)$, получаемые алгоритмом адаптации. Таким образом, регулятор описывается вместо уравнения (3) уравнением

$$u(t) = U(y(t),\ r(t),\ \theta_*(\hat{\xi}(t))). \qquad (14)$$

Для осуществления адаптации вводится вспомогательная система, структура которой совпадает со структурой объекта, — так называемая *настраиваемая модель объекта управления*:

$$\dot{\hat{x}}(t) = F(\hat{x},\ u(t),\ 0,\ \hat{\xi}(t)). \qquad (15)$$

Параметры настраиваемой модели $\hat{\xi}(t)$ и есть оценки вектора ξ, получаемые при помощи алгоритма адаптации:

$$\dot{\hat{\xi}}(t) = \Psi(y(t),\ \hat{x}(t),\ u(t),\ \hat{\xi}(t)). \qquad (16)$$

Цель адаптации, исходя из которой строится алгоритм адаптации (16), состоит в приближении вектора состояния $\hat{x}(t)$ настраиваемой модели (15) к состоянию объекта $x(t)$:

$$\|x(t) - \hat{x}(t)\| \le \varepsilon,\ \ t \ge t_a. \qquad (17)$$

Настраиваемая модель так же, как и эталонная модель, может присутствовать в системе неявно. Тогда цель адаптации аналогично (6) задается соотношениями

$$\|\dot{x}(t) - F(x(t),\ u(t),\ \hat{\xi}(t))\| \le \varepsilon,\ \ t \ge t_a, \qquad (18)$$

а в алгоритм адаптации (16) вектор $\hat{x}(t)$ не входит. Для исследования системы (1), (2), (14)–(16) применима теорема, в которой в качестве настраиваемых параметров выступает вектор оценок неизвестных параметров объекта $\hat{\xi}(t)$, а в качестве цели управления — цель адаптации, заданная при помощи некоторой целевой функции аналогично (7).

Если для реализации алгоритмов регулирования или адаптации требуется знание фазовых координат, недоступных измерению (или их измерение дорогостоящее), в систему может быть введен наблюдатель. Параметры наблюдателя удобно выбирать, исходя из имеющихся текущих оценок параметров объекта. Однако более универсальный подход состоит в оценивании параметров объекта одновременно с оцениванием состояния, т. е. наблюдатель оказывается адаптивным [26–30]. Важно, что в этом случае исследование работоспособности системы должно проводиться по отношению к трем подцелям: сходимости оценки состояния ОУ, сходимости оценки параметров ОУ и достижению цели управления (сходимости состояния ОУ к состоянию ЭМ).

При описанном подходе цель адаптации не совпадает с целью управления и состоит в приближении движения настраиваемой модели к движению объекта (идентификации). Поэтому этот подход называют *непрямым*, или *идентификационным*. Идентификационный подход позволяет применять более сложные законы регулирования, чем прямой подход. В частности, в этом случае широко используется принцип модального управления [3, 4, 7, 8]. Разделение целей адаптации и управления дает возможность независимо синтезировать основной контур и контур адаптации, что облегчает построение адаптивного регулятора. С другой стороны, затрудняется обоснование работоспособности системы, так как из достижения цели адаптации не следует непосредственно достижение исходной цели управления.

Пример

Пусть ОУ описывается управляемым логистическим уравнением

$$\dot{x} = ax(d - x) + u, \tag{19}$$

где a, d — неизвестные параметры ОУ, а ЭМ — линейное апериодическое звено:

$$\dot{x}_M = -a_M x_M + r(t). \tag{20}$$

Зададим целевую функцию в виде квартики

$$Q(e) = (x - x_M)^4 \tag{21}$$

и выберем сначала компенсирующий закон управления

$$u(t) = -a_M x_M + r(t) - ax(d - x) - ke, \tag{22}$$

где $k > 0$ — заданное число. Очевидно, уравнение ошибки в замкнутой системе (19), (20), (22) имеет вид $\mathrm{d}e/\mathrm{d}t = -ke$, т. е. ошибка затухает экспоненциально быстро. Однако закон управления (22) нельзя реализовать, поскольку он зависит от неизвестных параметров. Поэтому неизвестные параметры заменяются настраиваемыми и вводится адаптивный регулятор

$$u(t) = -a_M x_M + r(t) + \theta_1 x + \theta_2 x^2 - ke, \tag{23}$$

где θ_1, θ_2 — настраиваемые параметры. Для синтеза алгоритма настройки параметров (алгоритма адаптации) воспользуемся методом скоростного градиента и вычислим скорость изменения целевой функции (21) в силу системы (19), (20), (22):

$$\dot{Q} = 4e^3[(\theta_1 + ad)x + (\theta_2 - a)x^2 - ke]. \tag{24}$$

Дифференцируя (24) по настраиваемым параметрам, получим алгоритм адаптации

$$\dot{\theta}_1 = -\gamma e^3 x - \alpha(\theta_1 - \bar{\theta}_1);$$
$$\dot{\theta}_2 = -\gamma e^3 x^2 - \alpha(\theta_2 - \bar{\theta}_2), \tag{25}$$

где $\gamma > 0$; $\alpha > 0$; $\bar{\theta}_1$, $\bar{\theta}_2$ — параметры алгоритма. Для исследования работоспособности синтезированного адаптивного регулятора проверим условия теоремы. Условия 1, 2 выполнены в силу гладкости правых частей системы. Условие выпуклости 3 выполнено вследствие линейности правой части (23) по настраиваемым параметрам. Выполнение условия 4 вытекает из (24) при $\theta_1 = -ad$, $\theta_2 = a$, при этом $\rho = 4k > 0$. Наконец, при проверке условия 5 условие согласованности (9) проверяется тривиально, и для справедливости утверждения теоремы остается потребовать ограниченности значений переменных параметров $a(t)$, $d(t)$ и скоростей их изменения.

Заключение

Движение многих реальных объектов описывается существенно нелинейными и нестационарными моделями. Ряд подходов к управлению такими объектами основан на построении внутренней модели нестационарности [11, 12, 18]. Однако параметры модели нестационарности могут меняться в широких пределах, что может привести к дополнительным погрешностям. В данной работе предполагается лишь, что скорость изменения параметров объекта ограничена, при этом начальная неопределенность может быть достаточно велика. Исследованы алгоритмы адаптивного управления для систем с явной эталонной моделью, синтезированные методом скоростного градиента, и показано, что при достаточно медленных изменениях параметров и малой начальной неопределенности предельная ошибка в системе может быть сделана сколь угодно малой. Синтез адаптивного регулятора проиллюстрирован примером.

Полученные результаты естественным образом могут быть распространены на задачи распределенного управления многоагентными системами. В зависимости от выбора целевой функции при синтезе алгоритма управления разработанные алгоритмы управления могут учитывать или не учитывать взаимодействие между агентами.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 17-08-01728.

Литература

1. **Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А.** *Адаптивное управление динамическими объектами*. М., Наука, 1981. 448 с.
2. **Тимофеев А. В.** *Построение адаптивных систем управления программным движением*. Л., Энергия, 1980. 88 с.
3. **Деревицкий Д. П., Фрадков А. Л.** *Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления*. М., Наука, 1981. 216 с.
4. **Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В.** *Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением*. Л., Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
5. **Цыкунов А. М.** *Адаптивное управление объектами с последействием*. М., Наука, 1984. 239 с.

6. **Фомин В. Н.** *Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация*. М., Наука, 1984. 288 с.
7. **Фрадков А. Л.** *Адаптивное управление в сложных системах*. М., Наука, 1990. 292 с.
8. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** *Нелинейное и адаптивное управление в сложных динамических системах*. СПб., Наука, 2000. 562 с.
9. **Никифоров В. О.** *Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений*. СПб., Наука, 2003. 282 с.
10. **Тюкин И. Ю., Терехов В. А.** *Адаптация в нелинейных динамических системах*. М., УРСС, 2008. 384 с.
11. **Цыкунов А. М.** *Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу*. М., Физматлит, 2009. 268 с.
12. **Бобцов А. А.** *Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу*. СПб., Наука, 2011. 174 с.
13. **Амелина Н. О., Ананьевский М. С., Андриевский Б. Р., Граничин О. Н., Джунусов И. А., Матвеев А. С., Проскурников А. В., Пчёлкина И. В., Селиванов А. А., Фрадков А. Л., Фридман Э. М., Фуртат И. Б.** *Проблемы сетевого управления*/ под ред. А. Л. Фрадкова. М.-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2015. 392 с.
14. **Astrom K. J., Wittenmark B.** *Adaptive control*. Courier Corporation, 2013. 574 p.
15. **Marino R., Tomei P.** Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89. doi:10.1109/9.654892
16. **Marino R., Tomei P.** An adaptive output feedback control for a class of nonlinear systems with time-varying parameters. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1999, vol. 44, iss. 11, pp. 2190–2194. doi:10.1109/9.802943
17. **Ge S. S., Wang J.** Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients. *IEEE Trans. Automat Contr.*, 2003, vol. 48, iss. 8, pp. 1463–1469. doi:10.1109/TAC.2003.815049
18. **Wang C., Lin Y.** Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatica*, 2015, vol. 54, pp. 16–24. doi:10.1016/j.automatica.2017.03.010
19. **Huang J., Wang W., Wen C., Zhou J.** Adaptive control of a class of strict-feedback time-varying nonlinear systems with unknown control coefficients. *Automatica*, 2018, vol. 93, pp. 98–105. doi:10.1016/j.automatica.2018.03.061
20. **Meza-Aguilar M., Loukianov A. G., Rivera J.** Sliding mode adaptive control for a class of nonlinear time-varying systems. *Intern. J. Robust and Nonlinear Control*, 2019, vol. 29, iss. 3, pp. 766–778. doi:10.1002/rnc.4319
21. **Marino R., Tomei P.** Global adaptive output-feedback control of nonlinear-systems. Part II: Nonlinear Parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control.*, 1993, vol. 38, iss.1, pp. 33–48. doi:10.1109/9.186309
22. **Karsenti L., Lamnabhi-Lagarrigue F., Bastin G.** Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization. *Systems & Control Letters*, 1996, vol. 27, iss. 2, pp. 87–97. doi:10.1016/S1474-6670(17)57975-6
23. **Chen W., Anderson B. D. O.** A combined multiple model adaptive control scheme and its application to nonlinear systems with nonlinear parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2012, vol. 57, iss. 7, pp. 1778–1782. doi:10.1109/TAC.2011.2176162
24. **Asadi M., Shandiz H. T.** Adaptive control of pure-feedback systems with nonlinear parameterization via time-scale separation. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, vol. 15, iss. 1, pp. 196–204. doi:10.1007/s12555-015-0274-x
25. **Wang H., Zhu Q.** Adaptive output feedback control of stochastic nonholonomic systems with nonlinear parameterization. *Automatica*, 2018, vol. 98 (12), pp. 247–255. doi:10.1016/j.automatica.2018.09.026
26. **Farza M., M'Saad M., Maatoug T., Kamoun M.** Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems. *Automatica*, 2009, vol. 45, iss. 10, pp. 2292–2299. doi:10.1016/j.automatica.2009.06.008
27. **Khalil H. K., Praly L.** High-gain observers in nonlinear feedback control. *Internat. J. Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, iss.6, pp. 993–1015. doi:10.1002/rnc.3051
28. **Ekramian M., Sheikholeslam F., Hosseinnia S., Yazdanpanah M. J.** Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 2013, vol. 62, iss. 4, pp. 319–323. doi:10.1016/j.sysconle.2013.01.002
29. **Rios H., Efimov D., Perruquetti W.** An adaptive sliding-mode observer for a class of uncertain nonlinear systems. *Internat. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 511–527. doi:10.1002/acs.2857
30. **Томчина О. П., Горлатов Д. В., Томчин Д. А., Свенцицкая Т. А.** Алгоритм адаптивного управления механическими системами с неявной эталонной моделью и фильтрацией. *Информатика и системы управления*, 2018, № 3 (57), с. 124–130.

UDC 681.5
doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms

O. P. Tomchina[a], PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/ 0000-0002-6109-2143
D. N. Polyakhov[b], PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-4134-0189
O. I. Tokareva[c], Associate Professor, orcid.org/0000-0003-4656-3151
A. L. Fradkov[d,e] Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-5633-0944, fradkov@mail.ru
[a]Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya St., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation
[b]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaia St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation
[c]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya St., 198035, Saint-Petersburg, Russian Federation
[d]Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation
[e]Institute for Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The motion of many real world systems is described by essentially non-linear and non-stationary models. A number of approaches to the control of such plants are based on constructing an internal model of non-stationarity. However, the non-stationarity model parameters can vary widely, leading to more errors. It is only assumed in this paper that the change rate of the object parameters is limited, while the initial uncertainty can be quite large. **Purpose:** Analysis of adaptive control algorithms for non-linear and time-varying systems with an explicit reference model, synthesized by the speed gradient method. **Results:** An estimate was obtained for the maximum deviation of a closed-loop system solution from the reference model solution. It is shown that with sufficiently slow changes in the parameters and a small initial uncertainty, the limit error in the system can be made arbitrarily small. Systems designed by the direct approach and systems based on the identification approach are both considered. The procedures for the synthesis of an adaptive regulator and analysis of the synthesized system are illustrated by an example. **Practical relevance:** The obtained results allow us to build and analyze a broad class of adaptive systems with reference models under non-stationary conditions.

Keywords — adaptive system, reference model, non-linear and time-varying systems, speed gradient method, direct approach, identification approach.

For citation: Tomchina O. P., Polyakhov D. N., Tokareva O. I., Fradkov A. L. Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 37–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

References

1. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami* [Adaptive control of dynamic objects]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 448 p. (In Russian).
2. Timofeev A. V. *Postroenie adaptivnyh sistem upravleniya programmnym dvizheniem* [Construction of adaptive software motion control systems]. Leningrad, Energia Publ., 1980. 88 p. (In Russian).
3. Derevitsky D. P., Fradkov A. L. *Prikladnaya teoriya diskretnyh adaptivnyh sistem upravleniya* [Applied theory of discrete adaptive control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 216 p. (In Russian).
4. Bortsov Yu. A., Polyakhov N. D., Putov V. V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 216 p. (In Russian).
5. Tsykunov A. M. *Adaptivnoe upravlenie ob"ektami s posledejstviem* [Adaptive control of retarded plants]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 230 p. (In Russian).
6. Fomin V. N. *Rekurrentnoe ocenivanie i adaptivnaya fil'traciya* [Recurrent estimation and adaptive filtering]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 288 p. (In Russian).
7. Fradkov A. L. *Adaptivnoe upravlenie v slozhnyh sistemah* [Adaptive control in complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 292 p. (In Russian).
8. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie v slozhnyh dinamicheskih sistemah* [Nonlinear and adaptive control in complex dynamic systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2000. 562 p. (In Russian).
9. Nikiforov V. O. *Adaptivnoe i robastnoe upravlenie s kompensaciej vozmushchenij* [Adaptive and robust control with compensation of disturbances]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2003. 282 p. (In Russian).
10. Tyukin I. Yu., Terekhov V. A. *Adaptaciya v nelinejnyh dinamicheskih sistemah* [Adaptation in nonlinear dynamic systems]. Moscow, URSS Publ., 2008. 384 p. (In Russian).
11. Tsykunov A. M. *Adaptivnoe i robastnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami po vyhodu* [Adaptive and robust output feedback control of dynamic plants]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 268 p. (In Russian).
12. Bobtsov A. A. *Adaptivnoe i robastnoe upravlenie neopredelennymi sistemami po vyhodu* [Adaptive and robust output feedback control of uncertain systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2011. 174 p. (In Russian).
13. Amelina N. O., Ananyevsky M. S., Andrievsky B. R., Granichin O. N., Dzhunusov I. A., Matveev A. S., Proskurnikov A. V., Pchyolkina I. V., Selivanov A. A., Fradkov A. L., Fridman E. M., Furtat I. B. *Problemy setevogo upravleniya* [Network control problems]. Ed. A. L. Fradkov. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternyh issledovanij Publ., 2015. 392 p. (In Russian).
14. Astrom K. J., Wittenmark B. *Adaptive control*. Courier Corporation Publ., 2013. 574 p.
15. Marino R., Tomei P. Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89. doi:10.1109/9.654892
16. Marino R., Tomei P. An adaptive output feedback control for a class of nonlinear systems with time-varying parameters. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1999, vol. 44, iss. 11, pp. 2190–2194. doi:10.1109/9.802943
17. Ge S. S., Wang J. Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients. *IEEE Trans. Automat Contr.*, 2003, vol. 48, iss. 8, pp. 1463–1469. doi:10.1109/TAC.2003.815049
18. Wang C., Lin Y. Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatica*, 2015, vol. 54, pp. 16–24. doi:10.1016/j.automatica.2017.03.010
19. Huang J., Wang W., Wen C., Zhou J. Adaptive control of a class of strict-feedback time-varying nonlinear systems with unknown control coefficients. *Automatica*, 2018, vol. 93, pp. 98–105. doi:10.1016/j.automatica.2018.03.061

20. Meza-Aguilar M., Loukianov A. G., Rivera J. Sliding mode adaptive control for a class of nonlinear time-varying systems. *Intern. J. Robust and Nonlinear Control*, 2019, vol. 29, iss. 3, pp. 766–778. doi:10.1002/rnc.4319
21. Marino R., Tomei P. Global adaptive output-feedback control of nonlinear-systems. Part II. Nonlinear Parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control.*, 1993, vol. 38, iss. 1, pp. 33–48. doi:10.1109/9.186309
22. Karsenti L., Lamnabhi-Lagarrigue F., Bastin G. Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization. *Systems & Control Letters*, 1996, vol. 27, iss. 2, pp. 87–97. doi:10.1016/S1474-6670(17)57975-6
23. Chen W., Anderson B. D. O. A combined multiple model adaptive control scheme and its application to nonlinear systems with nonlinear parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2012, vol. 57, iss. 7, pp. 1778–1782. doi:10.1109/TAC.2011.2176162
24. Asadi M., Shandiz H. T. Adaptive control of pure-feedback systems with nonlinear parameterization via time-scale separation. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, vol. 15, iss. 1, pp. 196–204. doi:10.1007/s12555-015-0274-x
25. Wang H., Zhu Q. Adaptive output feedback control of stochastic nonholonomic systems with nonlinear parameterization. *Automatica*, 2018, vol. 98 (12), pp. 247–255. doi:10.1016/j.automatica.2018.09.026
26. Farza M., M'Saad M., Maatoug T., Kamoun M. Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems. *Automatica*, 2009, vol. 45, iss. 10, pp. 2292–2299. doi:10.1016/j.automatica.2009.06.008
27. Khalil H. K., Praly L. High-gain observers in nonlinear feedback control. *Internat. J. Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, iss. 6, pp. 993–1015. doi:10.1002/rnc.3051
28. Ekramian M., Sheikholeslam F., Hosseinnia S., Yazdanpanah M. J. Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 2013, vol. 62, iss. 4, pp. 319–323. doi:10.1016/j.sysconle.2013.01.002
29. Rios H., Efimov D., Perruquetti W. An adaptive sliding-mode observer for a class of uncertain nonlinear systems. *Internat. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 511–527. doi:10.1002/acs.2857
30. Tomchina O. P., Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Sventsitskaya T. A. Adaptive control algorithm for mechanical systems with implicit reference model and filtration. *Information Science and Control Systems*, 2018, no. 3 (57), pp. 124–130 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): https://orcid.org