

*С.П. Круглов*¹

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

ИДЕНТИФИКАЦИОННОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛЬЮ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА

Аннотация. В статье дается краткое обобщение полученных результатов по использованию «упрощенных условий адаптируемости» при построении адаптивной системы управления с текущей параметрической идентификацией и неявной эталонной моделью для априорно неопределенной математической модели объекта и влиянии неконтролируемых возмущений. Основные результаты представляются для случая полностью измеряемых переменных состояниям и их производных. Обобщения на случай описания математической модели объекта управления в пространстве состояний были показаны ранее. Описываемый метод обладает рядом достоинств, но обладает и недостатками. В плане совершенствования описываемого метода предлагается применять настраиваемую модель в рекуррентном алгоритме параметрической идентификации в виде инверсной модели объекта управления. Это повышает устойчивость замкнутой системы управления на установившихся процессах, а также упрощает алгоритм синтеза закона управления.

Ключевые слова: алгоритм текущей идентификации, адаптивное управление, инверсная модель, невязка идентификации, объект управления, эталонная модель, условия адаптируемости.

*S.P. Kruglov*¹

¹ *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

THE IDENTIFICATION ADAPTIVE CONTROL WITH INVERSE MODEL OF THE OBJECT DYNAMICS

Abstract. The article provides a brief synthesis of the results obtained on the use of "simplified adaptability conditions" in the construction of an adaptive control system with current parametric identification and an implicit reference model for the a priori uncertain mathematical model of the object and the influence of uncontrolled perturbations. The main results are presented for fully measurable variable states and their derivatives. Generalizations to the case of describing the mathematical model of a control object in state space have been shown previously. The described method has a number of advantages, but also disadvantages. In terms of improvement of the described method, it is proposed to use a tunable model in the recurrent algorithm of parametric identification in the form of an inverse model of the control object. This increases the stability of the closed control system on steady-state processes, as well as simplifies the algorithm for synthesizing the control law.

Keywords: algorithm of the current identification, adaptive control, identification discrepancy, inverse model, object of control, reference model, adaptability conditions.

Введение. В ряде работ, например, [1-4] рассматривается метод построения адаптивного управления объектом с априорно неопределенными параметрами со схемой «идентификатор + эталон» на основе «упрощенных условий адаптируемости». Этот метод обладает следующими положительными качествами:

– требования к текущей параметрической идентификации математической модели объекта управления значительно ослаблены – не требуется асимптотической точности оценок неизвестных параметров объекта;

– скорость достижения системой адаптивных свойств достаточно высокая, т.к. она зависит только от скорости сходимости невязки идентификации; при этом выписана четко определенная взаимосвязь координатной ошибки от невязки идентификации, что дает прямое указание на поведение замкнутой системы управления на всем промежутке времени, а не только при стремлении времени к бесконечности, как это используется, например, в широко известном методе скоростного градиента и его модификациях, что порождает неопределенность в выборе параметров настройки (см., например, [5-8]);

– в силу отсутствия требования точного оценивания параметров, снимается проблема идентифицируемости объекта управления в известных условиях «небогатого» входного сигнала и замкнутого контура; система может выполнять свои функции на фоне естественных процессов в системе управления;

– сформулированные требования к оценкам параметров просты и конструктивны;

– в силу высокой скорости адаптируемости и слабых требований к точности оценок параметров класс объектов управления может быть значительно расширен с включением существенно нестационарных (в смысле скорости изменения параметров) и некоторого класса нелинейных объектов;

– показана возможность построение адаптивного управления объектом в форме «вход-выход»; и другое.

Приведен ряд практических применений рассматриваемого подхода для решения различных задач адаптивного управления с демонстрацией его эффективности, например, [9-11].

Однако в постановке работ [1-4, 9-11] в алгоритме текущей идентификации используется модель объекта управления с прямой (неинверсной) динамикой. Как показывает опыт использования такой системы управления, это порождает некоторые «сложные» моменты. Данная работа направлена на их устранение и является продолжением этих и других работ.

Исходный подход к синтезу адаптивной системы управления. Кратко рассмотрим построение адаптивного управления на основе «упрощенных условий адаптируемости» на примере объекта управления с измерением состояний и их производных (имеется возможность более сложных и широких постановок задачи).

Пусть объект управления относится к классу стабилизируемых объектов и описывается матричным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{x}(t) = A(x,t)x(t) + B(x,t)u(t) + \xi_x(t), \quad \xi_x(t) \approx C(t)w(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор состояния (выходы) объекта размера n , а x_0 – его начальное состояние; $u(t)$ – вектор управления (закон управления) размера m ; $\xi_x(t)$ – векторная функция внешних неконтролируемых возмущений размера n ; $w(t)$ – вектор известных функций времени размера l ; $A(x,t), B(x,t), C(t)$ – матрицы неизвестных параметров ОУ и внешних возмущений (первая из них – матрица собственной динамики объекта, вторая – матрица эффективности управления) соответствующего размера; считаем, что матрица B имеет полный строчный ранг, т.е. $\text{rank} B = m \leq n$ (если это не так, то указанное всегда можно искусственно получить, рассматривая только часть элементов вектора u); t – текущее время; t_0 – начальный момент времени; \dot{x}, x, u – непосредственно измеряемые векторы.

Следует отметить, что вектор внешних возмущений в (1) не всегда может быть параметризован в виде $\xi_x \approx Cw$, тогда при идентификации оцениваются только матрицы A, B . Влияние на процесс оценивания внешних возмущений пытаются нейтрализовать дополнительными решениями.

Назначается неявная (существующая только в виде уравнения) эталонная модель (эталон), задающая требуемые динамические свойства замкнутой системы управления, в виде матричного равенства:

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M u_{\text{зад}}, \quad x_M(t_0) = x_0, \quad (2)$$

где x_M – вектор состояния эталона, имеющий тот же размер, что и x ; $u_{\text{зад}}$ – заданное управляющее воздействие на входе замкнутой системы управления (размер любой); A_M, B_M

– матрицы постоянных параметров эталона соответствующего размера; A_M – матрица собственной динамики эталона, является гурвицевой.

Координатной ошибкой (ошибкой управления) называется вектор-функция (e):

$$e \stackrel{\Delta}{=} x - x_M. \quad (3)$$

Для принципиальной возможности получения требуемого решения, считается, что эталон соответствует так называемому условию полного соответствия моделей (условию Эрцбергера) [12]:

$$\text{rank} B = \text{rank}[B, (A_M - A), B_M, C]. \quad (4)$$

Для достижения минимальных затрат на управление задается следующий функционал качества:

$$I = \int_{t_0}^t u^T(t) R^{-2}(t) u(t) dt, \quad (5)$$

где $R = R(t)$ – симметричная, положительно определенная матрица параметров функционала соответствующего размера; верхний индекс «Т» означает транспонирование.

Для преодоления неопределенности о параметрах объекта управления в системе предусматривается идентификатор, доставляющий в текущем времени по измерениям переменных оценки неизвестных параметров: $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ (крышка сверху элемента указывает на его оценку). Как правило, используется рекуррентный алгоритм текущей идентификации с внутренней настраиваемой моделью, соответствующей уравнению (1) в виде (показано в непрерывной форме):

$$\hat{\dot{x}} \stackrel{\Delta}{=} \hat{A}x + \hat{B}u + \hat{C}w, \quad (6)$$

где \hat{x} – отклик настраиваемой модели.

В работе этого алгоритма отметим важную вектор-функцию, называемую невязкой идентификации (ε):

$$\varepsilon \stackrel{\Delta}{=} \dot{x} - \hat{\dot{x}} = \dot{x} - \hat{A}x - \hat{B}u - \hat{C}w. \quad (7)$$

Наиболее целесообразно использовать рекуррентный метод наименьших квадратов и его модификации, обладающий наилучшими свойствами сходимости оценок [13, 14]. Известно, что при работе алгоритма идентификации невязка идентификации с первых шагов работы рекуррентного алгоритма сходится в область нуля, в отличие от оценок параметров (см. обоснование этого в работе [15] для условий разомкнутого контура).

Закон управления, построенный на текущих оценках, определяется как:

$$u = \hat{B}^+ (\dot{x}_{\text{ж}} - \hat{A}x - \hat{C}w); \quad \dot{x}_{\text{ж}} \stackrel{\Delta}{=} A_M x + B_M u_{\text{зад}}, \quad (8)$$

где \hat{B}^+ – матрица, псевдообратная к \hat{B} ; $\dot{x}_{\text{ж}}$ – желаемое значение производной состояния объекта управления для обеспечения поведения замкнутой системы управления как эталон.

Структура адаптивной системы управления представлена на рис.1.



Рис. 1. Структура адаптивной системы управления

В работе [4] показано, что, в частности, если выполняется хотя-бы одно из представленных ниже условий, взаиморанжированных по «ширине» области (причем только оценки \hat{B}) в сторону убывания:

$$\begin{aligned}
 \text{rank}(\hat{B}^T B) &= \text{rank} B; \\
 \text{rank} \hat{B} &= \text{rank}(\hat{B}, B); \\
 \hat{B} \hat{B}^+ &= B B^+; \\
 \text{rank} \hat{B} &= n \quad (m = n); \\
 \hat{B} &= B,
 \end{aligned} \tag{9}$$

в замкнутом контуре системы управления координатная ошибка описывается простым линейным дифференциальным уравнением (K – $n \times n$ матрица)

$$\dot{e} - A_M e = K \varepsilon, \quad e(t_0) = 0, \tag{10}$$

с устойчивой по определению левой частью, где для первого условия (9) спектральная норма $\|K\|_2$ ограничена, а для остальных: $\|K\|_2 \leq 1$.

Если же дополнительно выполнено любое из также взаиморанжированных условий:

$$\begin{aligned}
 \text{rank}(B^T, \hat{B}^T) &= \text{rank} B; \\
 \hat{B}^+ \hat{B} &= B^+ B; \\
 \text{rank} \hat{B} &= \text{rank} B = m; \\
 \hat{B} &= B,
 \end{aligned} \tag{11}$$

тогда синтезируемое системой управление (8) имеет близость к оптимальному (доставляет значение функционала (5) близкое минимуму) со степенью близости невязки идентификации к нулю.

Отсюда следует, что достижение адаптируемости ($e \rightarrow 0$) со свойствами субоптимальности управления получаем со скоростью приближения к нулю невязки идентификации. Кроме того, уравнение (10) описывает динамику замкнутой системы

управления на всем промежутке времени. Все это указывает на отмеченные выше свойства адаптивного управления с «упрощенными условиями адаптируемости».

В работе [15] также сформулированы уточнения к оценке \hat{B} с целью обеспечения диссипативной сходимости невязки идентификации в замкнутой системе управления с законом управления (8) при работе рекуррентного метода наименьших квадратов. Эти требования сводятся к следующему.

Для сходимости собственного высокочастотного движения ε достаточно, чтобы m собственных чисел матрицы $(\hat{B}^+ B)$ находились внутри круга на поле комплексных чисел, представленном на рис.2.

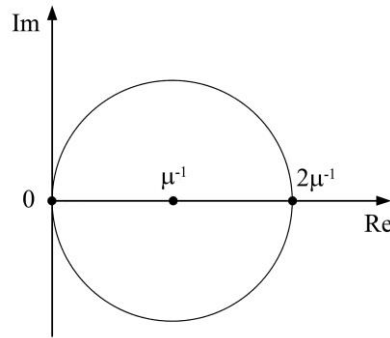


Рис. 2. Требуемое расположение m собственных чисел матрицы $(\hat{B}^+ B)$

На рисунке обозначено: $\mu \triangleq y^T P y$, $0 < \mu < 1$; $y \triangleq [x, u, w]^T$ – вектор регрессоров, используемый алгоритмом идентификации. Также требуется обеспечить невысокой скоростью изменения оценки \hat{B} . Для сходимости движения ε в области низких частот, соответствующих рабочим частотам объекта, требуется ограничить норму $\|\hat{B}\|$.

Это достаточно простые условия. Например, если B – скаляр ($n = m = 1$, обозначим, как b , а его оценку – \hat{b}). Требование к оценке \hat{b} , в частности, определяется как:

$$\text{sign}(\hat{b}) = \text{sign}(b); \quad |\hat{b}| \in [0.5, 2]|b|; \quad d\hat{b}/dt \rightarrow 0. \quad (12)$$

Заметим, что оценка \hat{b} , удовлетворяющая (12) также удовлетворяет требованиям (9) и (11). Наиболее просто выполнить это требование, задав оценку \hat{b} постоянной на основе достаточно приблизительной априорной информации о параметре b .

Если B – есть вектор-столбец, то требование (12) интерпретируется как попарное соотношение соответствующих элементов \hat{B} и B . Оно является достаточным условием устойчивости невязки идентификации. Для матричного случая – попарное соотношение (12) является лишь необходимым условием. Более точный результат даст в конкретных задачах использование известных методов локализации собственных чисел матрицы, например, кругов Гершгорина [16].

Указанный подход для построения адаптивной системы управления, описываемый соотношениями (1) – (12), помимо указанных положительных свойств обладает следующим недостатком, выявленным из опыта применения этого метода. Управление объектом (1) приходится строить на разных режимах его работы, в том числе и на установившихся режимах с постоянным управлением, когда $\dot{x} \cong 0$. В этом случае элементы вектора регрессоров как функции времени приближаются к линейной зависимости. Это приводит к сбоям рекуррентного метода наименьших квадратов в силу внутренней процедуры обращения матрицы [13, 14, 17]. Как результат – неустойчивость, выбросы регулируемых переменных. Кроме того, для реализации закона управления (8) требуется достаточно

сложная процедура псевдообращения. Эти недостатки можно устранить, используя ниже изложенный метод.

Алгоритм управления с инверсной настраиваемой моделью. Умножим уравнение (1) слева на матрицу B^+ (в принятых условиях B^+B – есть единичная матрица), и в соответствии с результатом запишем настраиваемую модель вместо (6) в виде инверсной динамики объекта с откликом по управлению (\hat{u}):

$$\hat{u} \triangleq \hat{D}_1 \dot{x} + \hat{D}_2 x + \hat{D}_3 w, \quad (13)$$

где $D_1 \triangleq B^+$; $D_2 \triangleq -B^+A$; $D_3 \triangleq -B^+C$. Здесь вектором регрессоров будет $[\dot{x}, x, w]^T$, а невязка идентификации (обозначим ее как ε_B):

$$\varepsilon_B \triangleq u - \hat{u} = u - \hat{D}_1 \dot{x} - \hat{D}_2 x - \hat{D}_3 w = -\hat{B}^+ \varepsilon, \quad (14)$$

где ε – в данном случае виртуальная невязка идентификации для виртуальной настраиваемой модели, соответствующей равенству (6).

Заметим, что при настраиваемой модели (13), закон управления (8) запишется в виде:

$$u = \hat{D}_1 \dot{x}_ж + \hat{D}_2 x + \hat{D}_3 w, \quad (15)$$

т.е. напрямую по оценкам, доставляемым алгоритмом идентификации.

При выходе объекта управления на установившийся процесс регрессор \dot{x} обнуляется, его несложным способом можно исключить из процедуры текущей идентификации, как, например, предлагается в модификациях рекуррентного метода наименьших квадратов [17]. Это сохранит устойчивость алгоритма идентификации, основанной на процедуре наименьших квадратов, а как следствие – устойчивость всей системы управления.

Выше было показано, что при поэлементном выполнении (12) обеспечивается сходимость виртуальной невязки идентификации ε (для скалярного и векторного случая B , для матричного случая это только необходимо). В силу (14) и ограниченности норм $\|\hat{B}^+\|$ и $\|\hat{B}\|$ по (12), это обеспечивает потенциальную сходимость невязки идентификации ε_B . Алгоритм текущей идентификации, обеспечивая диссипативную сходимость последней, обеспечивает такое же свойство и для виртуальной невязки идентификации. И если также выполняются условия (9) и (11) для виртуальной оценки \hat{B} , соответствующей \hat{D}_1 , то, в силу тождественности законов (8) и (15), все выводы для системы управления с прямой настраиваемой моделью справедливы и здесь. То есть замкнутая система управления с законом управления (15), настраиваемой моделью (13) и невязкой идентификации (14) обладает всеми теми же свойствами, что при настраиваемой модели (6), невязке идентификации (7) и законе управления (8). Но при этом сохраняется устойчивость замкнутой системы управления на установившихся процессах объекта и проще реализация алгоритма управления.

Заключение. Предложенный метод построения адаптивной системы управления с идентификатором, неявной эталонной моделью и с «упрощенными условиями адаптируемости» на основе инверсной настраиваемой модели обладает всеми преимуществами исходной системы с неинверсной моделью, обеспечивает лучшую устойчивость на установившихся режимах объекта и проще в реализации. Численные исследования замкнутой системы управления с инверсной настраиваемой моделью подтверждают заявленные свойства.

Данный подход можно рекомендовать для синтеза адаптивных законов управления, связанных с тематиками работ [18-22] в плане реализации альтернативных вариантов решения задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент на изобретение RU 2191419 C1 G05B 13/04. Адаптивная система управления с идентификатором и эталонной моделью/ Бронников А.М., Круглов С.П., Максимов А.С., Сегедин Р.А., заявитель и патентообладатель Иркутский военный авиационный инженерный институт – 2001103478/09 от 05.02.2001, опубликовано 20.10.2002, Бюл. №29.
2. Патент на изобретение RU 2192031 C1 G05B 13/04. Адаптивная система управления с идентификатором и эталонной моделью при временных задержках информации в системе управления/ Бронников А.М., Круглов С.П., Максимов А.С., заявитель и патентообладатель Иркутский военный авиационный инженерный институт – 2001103423/09 от 05.02.2001, опубликовано 27.10.2002, Бюл. №30.
3. Патент на изобретение RU 2231819 C2 G05B 13/04. Адаптивная система управления с двухэтапным идентификатором и неявной эталонной моделью/ Буков В.Н., Круглов С.П., Бронников А.М., Сегедин Р.А., заявитель и патентообладатель Иркутский военный авиационный инженерный институт – 2002104086/0 от 13.02.2002, опубликовано 27.06.2004, Бюл. №18.
4. Круглов С.П. Адаптивная автоматизация пилотирования самолетом на больших углах атаки на основе упрощенных условий адаптируемости. Монография. Иркутск: Иркутский филиал Московского государственного университета гражданской авиации, 2012. – 248 с.
5. Фомин В.Н., Фрадков Ф.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. – 448 с.
6. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. – 296с.
7. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 2000. – 475с.
8. Путов В. В. Прямые и не прямые беспоисковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 4–11.
9. Круглов С.П., Лесников А.В. Адаптивное управление в тормозном пневмоцилиндре с регулируемым выхлопом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – 2016. – №3. – С.64-70.
10. Круглов С.П. Адаптивное управление неминимально-фазовым скалярным объектом второго порядка с обеспечением заданных характеристик переходного процесса // Научный вестник НГТУ. Т.65. №4. 2016. С. 33-53.
11. Круглов С.П., Ковыршин С.В., Ведерников И.Е. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т.56, №4. – С.114-122.
12. Уткин В.Н. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
13. Гроп Д. Методы идентификации систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 302 с.
14. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432 с.
15. Круглов С.П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. –2019. –№1. –

C.27-40 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 21.10.2019).

16. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.

17. Круглов С.П. Модификации рекуррентного метода наименьших квадратов с фактором забывания для функциональной устойчивости текущего параметрического оценивания динамических процессов// «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. –2019. –№1. –С. 1-12–Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 21.10.2019).

18. Патент на полезную модель RU 132209 U1 Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов/ Ларченко А.Г., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Попов С.И., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения – 2013115531/28 от 05.04.2013, опубликовано 10.09.2013, Бюл. №25.

19. Патент на полезную модель RU 132209 U1 Устройство для определения коэффициентов теплопередачи/ Александров А.А., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Попов С.И., Филатова С.Н., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения – 2014154288/28 от 30.12.2014, опубликовано 10.10.2015, Бюл. №28.

20. Сизых В.Н., Мухопад А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей // Научный вестник НГТУ. – 2014. – №1(54). – С. 34-45.

21. Антошкин С.Б., Баканов М.В., Сизых В.Н. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. №2(62). С. 15-23.

22. Буторин Д.В., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. №1(99). С. 44-53.

REFERENCES

1. Patent RU 2191419 C1 G05B 13/04. Adaptivnaya sistema upravleniya s identifikatorom i e`talonnoj model`yu [Adaptive control system with identifier and reference model], Bronnikov A.M., Kruglov S.P., Maksimov A.S., Segedin R.A., 05.02.2001.

2. Patent RU 2192031 C1 G05B 13/04. Adaptivnaya sistema upravleniya s identifikatorom i e`talonnoj model`yu pri vremenny`x zaderzhkax informacii v sisteme upravleniya [Adaptive control system with identifier and reference model in case of time delays of information in the control system], Bronnikov A.M., Kruglov S.P., Maksimov A.S., 05.02.2001.

3. Patent RU 2231819 C2 G05B 13/04. Adaptivnaya sistema upravleniya s dvuxe`tapny`m identifikatorom i neyavnoj e`talonnoj model`yu [Adaptive control system with two-stage identifier and implicit reference model], Bukov V.N., Kruglov S.P., Bronnikov A.M., Segedin R.A., 13.02.2002.

4. Kruglov S.P. Adaptivnaya avtomatizaciya pilotirovaniya samoletom na bol`shix uglax ataki na osnove uproshhenny`x uslovij adaptiruемости [Adaptive automation of aircraft piloting at high angles of attack based on simplified adaptability conditions], Monograph. Irkutsk, Irkutskij filial Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviacii [Irkutsk branch of the Moscow State University of Civil Aviation], 2012. 248 p.

5. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob`ektami [Adaptive control of the dynamic objects], Moscow, Nauka, 1981, 448 p.

6. Fradkov A.L. Adaptivnoe upravlenie v slozhny`x sistemax: bespoiskovy`e metody` [Adaptive control in complex systems - no-search methods], Moscow. Nauka. 1990. 296 p.

7. Andrievsij B.R., Fradkov A.L. Izbranny`e glavy` teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazy`ke MATLAB [Selected chapters of automatic control theory with examples in MATLAB], St.Petersburg. Nauka. 2000. 475 p.

8. Putov V.V. Pryamy`e i nepryamy`e bespoiskovy`e adaptivny`e sistemy` s mazhoriruyushhimi funkciyami i ix prilozheniya k upravleniyu mnogostepenny`mi nelinejny`mi uprugimi mexanicheskimi ob`ektami [Direct and indirect search-free adaptive systems with majoring functions and their applications to control multi-stepwise nonlinear elastic mechanical objects], Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [Mechatronics, Automation, Control], 2007. No.10. P. 4–11.

9. Kruglov S.P., Lesnikov A.V. Adaptivnoe upravlenie v tormoznom pnevmocilindre s reguliruemy`m vy`xlopom [The adaptive control of braking pneumatic cylinder with an adjustable exhaust], Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016. No.3. P.64-70.

10. Kruglov S.P. Adaptivnoe upravlenie neminimal`no-fazovy`m skalyarny`m ob`ektom vtorogo poryadka s obespecheniem zadanny`x karakteristik perexodnogo processa [Adaptive control of the non minimal-phase scalar object of the second order with maintenance of the preset transient characteristics], Nauchny`j vestnik NGTU [Science bulletin of the Novosibirsk state technical university], Vol.65. No4. 2016. P. 33-53.

11. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Vedernikov I.E. Adaptivnoe upravlenie peremeshheniem gruzha mostovy`m kranom s identifikacionny`m algoritmom [The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm], Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol.56. No4. P. 114-122.

12. Utkin V.N. Skol`zyashhie rezhimy` v zadachax optimizatsii i upravleniya [Sliding modes in optimization and control tasks], Moskow. Nauka. 1981.

13. Graupe D. Identification of systems. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1976 (Russ. ed.: Graupe D. Methods of identification of systems, Moscow, Mir, 302 p.)

14. Ljung L. System Identification: Theory for the User, University of Linkoping, Sweden (Russ. ed.: Ljung L. Identifikatsiya sistem: teoriya dlja pol'zovatelja, Moscow. Nauka. 1991. 432 p.).

15. Kruglov S.P. Skhodimost' nevyazki identifikatsii v sisteme upravleniya s parametriceskoy adaptatsiyey [Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 1. P. 27-40. [Accessed 21.10.19].

16. Voevodin V.V., Kuznecov Ju.A. Matricy i vychislenija [Matrixes and calculations]. Moskow. Nauka. 1984. 320 p.

17. Kruglov S.P. Modifikatsii rekurrentnogo metoda naimen'shikh kvadratov s faktorom zabyvaniya dlya funktsional'noy ustoychivosti tekushchego parametriceskogo otsenivaniya dinamicheskikh protsessov [Modifications of the rekurrent method of least squares with forgetting factor for the functional stability of the current parametrical estimation of dynamic processes] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 1. P. 1-12. [Accessed 21.10.19].

18. Patent RU 132209 U1 Ustrojstvo diagnostiki detalej iz poliamidny`x materialov [Device for diagnostics of parts made of polyamide materials], Larchenko F.G., Livshic A.V., Filippenko N.G., Popov S.I., 05.04.2013.

19. Patent RU 132209 U1 Ustrojstvo dlya opredeleniya koefficientov teploperedachi [Device for determining heat transfer coefficients], Aleksandrov A.A., Livshic A.V., Filippenko N.G., Popov S.I., Filatova S.N., 30.12.2014.

20. Sizykh V.N., Mukhopad A.Iu. Associativny`j avtomat adaptivnogo upravleniya texnologicheskimi processami na osnove nejronny`x setej [Associating automat for technological

processes adaptive control on based of neural networks]. Nauchny`j vestnik NGTU [Science bulletin of the Novosibirsk state technical university], 2014. No.1(54). P. 34-45.

21. Antoshkin S.B., Bakanov M.V., Sizykh V.N. Sistema upravleniya avtonomnogo robota na osnove metoda obratnykh zadach dinamiki [An autonomous robot control system based on an inverse problems method in dynamics]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62. No.2. P.15–23.

22. Butorin D.V., Livshic A.V., Filippenko N.G. Avtomatizaciya processa kontrolya fazovy`x i relaksacionny`x prevrashhenij v polimerny`x materialax [Automation process control of phase and relaxation transformation in polymer materials] // Informacionny`e sistemy` i texnologii [Information Systems and Technologies]. 2017. No.1. P. 44-53.

Информация об авторе

Круглов Сергей Петрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Author

Kruglov Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Для цитирования

Круглов С.П. Идентификационное адаптивное управление с инверсной моделью динамики объекта // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2019. – №3. – С. 1-10 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/34-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 20.11.2019)

For citations

Kruglov S.P. The identification adaptive control with inverse model of the object dynamics // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 3. P. 1-10. [Accessed 20/11/19]