



Для цитирования

For citation

Колосов А. Д. Сервис для решения задач булевой выполнимости с применением технологии NVIDIA CUDA // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. -Т. 56, № 4. -С. 107–114. -DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).107-114.

Kolosov A.D. Servis dlya resheniya zadach bulevoi vypolnimosti s primeneniem tekhnologii NVIDIA CUDA [A service for solving boolean satisfiability problem using NVIDIA CUDA technology]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No.4, pp. 107–114. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).107-114.

УДК 621.865.8; 681.51

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).114-122

С. П. Круглов, С. В. Ковыришин, И. Е. Ведерников

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

Дата поступления: 18 ноября 2017 г.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ГРУЗА МОСТОВЫМ КРАНОМ С ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ

Аннотация. Представлен вариант автоматизации технологического процесса на обогатительной угольной фабрике по перемещению груза мостовым краном на заданное расстояние с парированием раскачки в условиях априорной неопределенности о весе груза, длине троса, внешних неконтролируемых возмущениях, связанных с изменяющимся трением тележки и воздействием ветра на груз. В настоящее время существует достаточно большое число методов управления мостовым краном, но до сих пор вопросы автоматизации управления далеки от полного разрешения. В основном это связано с априорной неопределенностью. Предлагается построить адаптивную систему управления с идентификационным алгоритмом и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости, предъявляющих к идентификатору несложные требования по оцениванию неизвестных параметров. При этом описание объекта производится на основе аппроксимационной параметрической модели. Закон управления также строится на основе последовательного приближения с аппроксимирующими свойствами. Это обеспечивает устойчивость замкнутой системы управления. Для текущей параметрической идентификации используется рекуррентный алгоритм наименьших квадратов с фактором забывания. Приводится обоснование условий сходимости невязки идентификации в замкнутом контуре системы управления. Даже при неточных оценках неизвестных параметров объекта управления сходимость невязки идентификации обеспечивает целевое функционирование всей системы управления. Даны рекомендации для построения алгоритмического обеспечения системы управления с учетом реальных факторов: вырожденность движения, точность позиционирования груза при воздействии ветра и другое. Приведен пример, показывающий эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: мостовой кран, система автоматического управления, гашение колебаний, адаптивное управление, алгоритм текущей идентификации, оценки неизвестных параметров, эталонная модель.

S. P. Kruglov, S. V. Kovyryshin, I. E. Vedernikov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: November 18, 2017

THE ADAPTIVE CONTROL OF MOVEMENT OF CARGO BY THE OVERHEAD CRANE WITH AN IDENTIFICATION ALGORITHM

Abstract. The variant of automation of technological process at concentrating coal factory on movement of cargo by the overhead crane at a given distance with parrying of the swing in the conditions of aprioristic uncertainty about the cargo weight, the cable length, external uncontrollable perturbations connected with the changing friction of the cart, and impact of wind on cargo is presented in the article. At present, there is rather large number of methods for controlling the overhead crane, but questions of control automation are still far from full solution. Generally, it is connected with aprioristic uncertainty. It is suggested to construct an adaptive control system with an identification algorithm and implicit reference model with use of the "simplified" conditions of adaptability imposing simple requirements for estimation of unknown parameters to the identifier. At the same time the description of an object is made on the basis of approximating parametrical model. The law of control is also under construction on the basis of the consecutive approach with the approximating properties. Recommendations for creation of algorithmic providing a control system taking into account real factors are made: degeneracy of the movement, accuracy positioning of the cargo at impact of wind, et al. It provides stability of the closed control system. For the current parametrical identification the recurrent algorithm of the smallest squares with a forgetting factor is used. The justification of conditions of the identification error convergence is given in the closed control system contour. Even at inexact estimates of unknown parameters of an object of control, the identification error convergence provides target functioning of all control system. The example showing efficiency of the proposed approach is given in the paper.



Keywords: *overhead crane, automatic control system, oscillation damping, adaptive control, current identification algorithm, evaluations of unknown parameters, reference model.*

Введение

На современных углеобогащительных фабриках обогащение угля все чаще происходит на основе метода обогащения угля с помощью магнетита. Последний перемещается в ванну со взвешенным в воде углем со склада с помощью мостового крана. Мостовые краны являются сложными объектами управления. При их эксплуатации возникают проблемы, связанные с раскачиванием груза, что мешает работе оператора, затрудняя установку груза в намеченное место, увеличивает нагрузку на механизмы. Очевидно, требуется автоматизация, которая смогла бы снизить колебания груза при выполнении сложных операций по точному позиционированию, что значительно увеличит скорость и точность загрузочных операций, снизит простои, повысит эффективность всей системы. Однако построение такой автоматизации связано с рядом трудностей, обычно присутствующих на практике. Наиболее существенными из них являются заранее неизвестные параметры системы управления в текущий момент времени: вес груза, переменное сопротивление перемещения тележки, присутствие неконтролируемого внешнего воздействия на груз из-за ветра и др.

Известен ряд работ по автоматизации управления кранами, например, в [1] дан обширный обзор этих методов. Имеются реально существующие системы автоматического гашения колебаний груза, основанные на предварительном оценивании параметров системы управления с построением программы управления, например [2]. Данные системы требуют большое время предварительной настройки, а также в принципе не способны справиться с заранее неизвестными факторами: переменные коэффициенты трения тележки, ветровые возмущения.

Известны работы, где используются методы нечеткого управления, например [3]. Однако стратегии с нечетким управлением создают будущую программу управления и не учитывают текущую неопределенность: изменяющееся трение тележки, возмущение от ветра и др.

В работе [4] для задачи перемещения груза предлагается использовать метод обратных задач динамики. Однако здесь требуется полная информация о параметрах объекта управления, т.е. не решается задача управления с априорной неопределенностью.

Существует подход к формированию робастной системы управления краном, предложенной в [5], однако этот метод не гарантирует время

сходимости процессов в замкнутой системе управления, что важно для практики. Известны работы с реализацией частной адаптируемости к весу груза, например [6, 7], которые не решают задачу адаптивного управления полностью.

В работе [8] для управления порталным краном предлагается использовать метод разделения движений на медленные – целевые и быстрые – побочные составляющие с применением двухконтурной системы управления с предварительно настраиваемыми ПИД-регуляторами. Такая система обладает свойствами робастности, но не решает задачу выбора параметров регулятора при априорно неопределенных условиях, в частности, внешних возмущениях.

Перспективным направлением в организации адаптивного управления краном является подход, основанный на управлении с предсказанием выходов. Метод строится на основе оценивания неизвестных параметров системы управления в текущем времени. Закон управления определяется на основе оптимизации квадратического функционала, включающего заданные и прогнозные значения выходов системы. Такой подход рассматривается, например, в [9-11]. Однако существуют проблемы с выбором параметров алгоритма оптимизации в конкретной ситуации для того, чтобы исключить попадание в локальный оптимум.

Из вышесказанного следует, что существующие методы управления мостовым краном не всегда способны удовлетворить жесткие практические требования по конкретности задания параметров используемых алгоритмов, обеспечения скорости, точности управления при текущей неопределенности параметров объекта и внешних возмущений.

Целью настоящей работы является создание такой автоматизированной системы, которая бы в условиях текущей неопределенности о параметрах объекта управления и возмущениях могла производить активное гашение колебаний груза и парировать внешние неконтролируемые возмущения. Предлагается построить адаптивную систему управления с идентификационным алгоритмом и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости [12, 13].

Основной результат.

Схема динамики движения мостового крана по одной оси представлена на рис. 1.

На рисунке введены следующие обозначения: тележка с линейным перемещением по оси x



с массой m_1 ; на тележку действует управляющая сила $f_{упр}$ и сила трения $f_{тр}$ (сухое и вязкое трение); груз массой m_2 и центральным моментом инерции J ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра $f_{вет}$; груз связан с тележкой с помощью троса длиной l ; φ – угол отклонения троса от вертикальной оси.

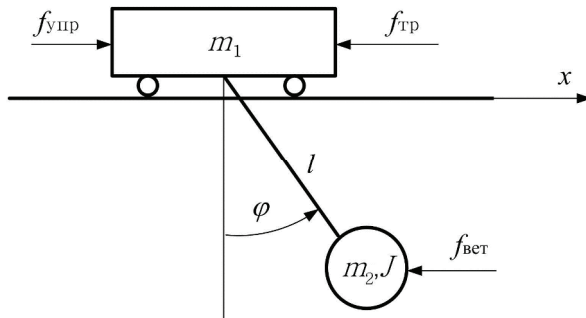


Рис. 1. Схема движения крана по одной оси

Уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка – маятник» без учета массы троса и вязкого трения углового движения (в силу их малости), а также без учета начальных значений переменных по положению и скорости описываются как [5]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2 l \cos \varphi \ddot{\varphi} = \mu_1; \\ m_2 l \cos \varphi \ddot{x} + (m_2 l^2 + J)\ddot{\varphi} = \mu_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu_1 \triangleq f_{упр} + m_2 l \sin \varphi \dot{\varphi}^2 - k_x \dot{x} - f_{с.тр}$;

$\mu_2 \triangleq -m_2 g l \sin \varphi - l \cos \varphi f_{вет}$; g – ускорение свободного падения; указанные производные переменных взяты по времени: $\dot{\varphi} \triangleq d\varphi(t)/dt$, t – текущее время; k_x – коэффициент вязкого трения поступательного перемещения тележки; $f_{с.тр}$ – сила сухого трения; указанные выше параметры в общем случае являются переменными (за исключением m_1) и заранее неизвестными; также считаем, что переменные x, φ и их производные непосредственно измеряются (вычисляются по измерениям) – для этого, например, можно использовать MPU6050 [14], совмещенный трехосевой датчик ускорения и угловой скорости, установленный на тележку и груз, а для измерения x – энкодер на тележке.

Разрешая эту систему относительно \ddot{x} и $\ddot{\varphi}$, найдем

$$\begin{cases} \ddot{x} = \chi^{-1} [(m_2 l^2 + J)\mu_1 - m_2 l \cos \varphi \mu_2]; \\ \ddot{\varphi} = \chi^{-1} [-m_2 l \cos \varphi \mu_1 + (m_1 + m_2)\mu_2], \end{cases} \quad (2)$$

где $\chi \triangleq [(m_1 + m_2)(m_2 l^2 + J) - (m_2 l \cos \varphi)^2]$.

В силу малости возможных значений угла φ ($|\varphi| < 20 \dots 30^\circ$) и малой скорости углового перемещения, будем считать, что $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \approx 0$. Поэтому вместо (2) можно записать

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{упр} + a_{x2} \varphi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\varphi} \approx a_{\varphi1} f_{упр} + a_{\varphi2} \varphi + a_{\varphi3} \dot{x} + a_{\varphi4}, \end{cases} \quad (3)$$

где $a_{x1} \triangleq \gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)$; $a_{x2} \triangleq \gamma^{-1}g(m_2 l)^2$;

$a_{x3} \triangleq -\gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)k_x$;

$a_{x4} \triangleq \gamma^{-1}[-(m_2 l^2 + J)f_{с.тр} + m_2 l^2 f_{вет}]$;

$a_{\varphi1} \triangleq -\gamma^{-1}m_2 l$; $a_{\varphi2} \triangleq -\gamma^{-1}(m_1 + m_2)m_2 g l$;

$a_{\varphi3} \triangleq \gamma^{-1}m_2 l k_x$;

$a_{\varphi4} \triangleq \gamma^{-1}l[m_2 f_{с.тр} - (m_1 + m_2)f_{вет}]$;

$\gamma \triangleq [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2)J]$.

Следует отметить, что поскольку в дальнейшем при синтезе закона управления используется аппроксимация модели (2) через оценки ее параметров, замена описания (2) зависимостями (3) вполне оправдана.

В качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики линейного перемещения тележки и углового движения груза, примем неявную модель в виде двух линейных стационарных звеньев второго порядка со значениями переменных в начальный момент времени, равных соответствующим для исходного объекта (в силу неясности эталонной модели):

$$\begin{cases} \ddot{x}_m = a_{x1}^m \dot{x}_m + a_{x2}^m (x_m - x_{зад}); \\ \ddot{\varphi}_m = a_{\varphi1}^m \dot{\varphi}_m + a_{\varphi2}^m (\varphi_m - \varphi_{зад}), \end{cases} \quad (4)$$

где x_m и φ_m – переменные, описывающие эталонную динамику линейного движения тележки и углового перемещения груза в зависимости от заданных значений $x_{зад}$ и $\varphi_{зад}$ соответственно; выбираемые параметры эталонной модели:

$a_{x1}^m \triangleq -2\xi_x^m \omega_x^m$; $a_{x2}^m \triangleq -(\omega_x^m)^2$; $a_{\varphi1}^m \triangleq -2\xi_\varphi^m \omega_\varphi^m$;

$a_{\varphi2}^m \triangleq -(\omega_\varphi^m)^2$; ξ_x^m, ξ_φ^m и $\omega_x^m, \omega_\varphi^m$ – эталонные относительные коэффициенты затухания и собственные частоты указанных звеньев по линейно-



му перемещению тележки и угловому перемещению груза соответственно [15].

Заметим, что если левые части уравнений (3) описываются в соответствии с назначенным эталоном (4) как

$$\begin{cases} \ddot{x} \cong a_{x1}^M \dot{x} + a_{x2}^M (x - x_{\text{зад}}); \\ \ddot{\varphi} \cong a_{\varphi1}^M \dot{\varphi} + a_{\varphi2}^M (\varphi - \varphi_{\text{зад}}), \end{cases} \quad (5)$$

тогда в силу принятых условий поведение объекта будет близко к поведению эталонной модели.

Управление ($f_{\text{упр}}$) будем строить так, чтобы оно обеспечивало заданное значение угла φ , которое, в свою очередь, будет определяться заданным положением тележки ($x_{\text{зад}}$). Тогда, подставляя в уравнения (3) вместо их левых частей правые части уравнений (5), несложно определить идеальное (построенное на точных значениях параметров объекта) заданное значение угла φ : $\varphi_{\text{зад}}^* = \varphi_{\text{зад}}^*(x_{\text{зад}})$ и требуемое идеальное управляющее воздействие $f_{\text{упр}}^* = f_{\text{упр}}^*(\varphi_{\text{зад}}^*)$. Для этого в первом уравнении вместо φ подставим $\varphi_{\text{зад}}^*$ и после преобразования получим:

$$\begin{cases} a_{x2} \varphi_{\text{зад}}^* + a_{x1} f_{\text{упр}}^* = v_1; \\ a_{\varphi2}^M \varphi_{\text{зад}}^* + a_{\varphi1} f_{\text{упр}}^* = v_2, \end{cases}$$

где $v_1 \triangleq (a_{x1}^M - a_{x3}) \dot{x} + a_{x2}^M (x - x_{\text{зад}}) - a_{x4}$;

$v_2 \triangleq a_{\varphi1}^M \dot{\varphi} + (a_{\varphi2}^M - a_{\varphi2}) \varphi - a_{\varphi3} \dot{x} - a_{\varphi4}$.

Отсюда можно найти искомые $f_{\text{упр}}^*$ и $\varphi_{\text{зад}}^*$ напрямую, используя обратную матрицу. Однако для нашего случая приблизительного, аппроксимационного описания объекта управления для устойчивости решения целесообразнее использовать рекуррентную процедуру поиска искомых значений, обладающих такими же аппроксимационными свойствами, к тому же более простую для реализации. Поэтому на основании последних соотношений предлагается следующий алгоритм:

$$\begin{bmatrix} \widehat{\varphi}_{\text{зад}}^* \\ \widehat{f}_{\text{упр}}^* \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} 0 & -a_{\varphi1} \\ -a_{x2} & 0 \\ a_{x1} & a_{\varphi2}^M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\varphi}_{\text{зад}}^* \\ \widehat{f}_{\text{упр}}^* \end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix} v_2 \\ v_1 \\ a_{x1} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{\varphi}_{\text{зад}}^* \\ \widehat{f}_{\text{упр}}^* \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где «крышка» сверху переменной здесь и далее означает ее оценку, например, $\widehat{\varphi}_{\text{зад}}^*$ – оценка $\varphi_{\text{зад}}^*$;

$i = 1, 2, 3, \dots$ – дискретные моменты времени с шагом Δt .

Для сходимости алгоритма требуется, чтобы собственные числа квадратной (2×2) матрицы в уравнении (6) по модулю были меньше единицы [15]. Эти числа несложно найти, откуда с учетом введенных определений следует неравенство, накладывающее ограничение на выбор эталонной модели:

$$\omega_{\varphi}^M > \omega_{\varphi}^{\text{кр}} \triangleq \sqrt{\gamma^{-1} g(m_2 l)^3 (m_2 l^2 + J)^{-1}}, \quad (7)$$

где $\omega_{\varphi}^{\text{кр}}$ – критическое значение ω_{φ}^M .

Полученное решение построено на полной априорной информации о параметрах объекта управления (3). Однако, по условию задачи, они априорно неизвестны. Для этого в системе управления будем использовать алгоритм текущей идентификации (идентификатор), доставляющий в реальном времени оценки этих параметров. В качестве такового предлагается использовать хорошо известный рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания для построчной оценки параметров (3) [16]:

$$\begin{cases} \widehat{\theta}_i = \widehat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \widehat{\theta}_{i-1}; \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1}] / \beta; \\ P_0 = \vartheta E_4; \quad 0 \ll \beta < 1, \end{cases} \quad (8)$$

где $\widehat{\theta}$ – вектор искомых оценок, для первой строки (3) – это $[\widehat{a}_{x1}, \widehat{a}_{x2}, \widehat{a}_{x3}, \widehat{a}_{x4}]^T$, для второй строки (3) – это $[\widehat{a}_{\varphi1}, \widehat{a}_{\varphi2}, \widehat{a}_{\varphi3}, \widehat{a}_{\varphi4}]^T$; верхний индекс «Т»

означает транспонирование; $y_i \triangleq [f_{\text{упр}}, \varphi, \dot{x}, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε – невязка идентификации; z – отклик объекта, для первой строки (3) – это \ddot{x} , для второй – это $\ddot{\varphi}$; P_i – матричный (4×4) коэффициент усиления алгоритма; β – назначаемый фактор забывания прошлых измерений, отличный от 1 для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами (часть из них может меняться во времени); ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; E_4 – единичная (4×4) матрица.

Предположим, что в синтезируемой системе управления обеспечивается через небольшой начальный промежуток времени работы системы условие для обеих строк: $\varepsilon \cong 0$ (условия этого будут обсуждены ниже), тогда в соответствии с (8) можно записать в непрерывном времени вместо (3):



$$\begin{cases} \dot{x} \approx \hat{a}_{x1} f_{\text{упр}} + \hat{a}_{x2} \Phi + \hat{a}_{x3} \dot{x} + \hat{a}_{x4}; \\ \ddot{\phi} \approx \hat{a}_{\phi1} f_{\text{упр}} + \hat{a}_{\phi2} \Phi + \hat{a}_{\phi3} \dot{x} + \hat{a}_{\phi4}, \end{cases} \quad (9)$$

а значит, можно строить закон управления, опираясь не на точные значения параметров объекта, а на их текущие оценки, доставляемые идентификатором.

Выполняя те же самые рассуждения, что были указаны выше, только на основе оценок параметров в силу (9), вместо идеальных соотношений (6) получим реальные

$$\begin{bmatrix} \Phi_{\text{зад}} \\ f_{\text{упр}} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{a}_{\phi1} \\ -\hat{a}_{x2} & 0 \\ \hat{a}_{x1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{\text{зад}} \\ f_{\text{упр}} \end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix} \hat{v}_2 \\ \hat{v}_1 \\ \hat{a}_{x1} \end{bmatrix}_i; \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{\text{зад}} \\ f_{\text{упр}} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\hat{v}_1 \triangleq (a_{x1}^m - \hat{a}_{x3})\dot{x} + a_{x2}^m(x - x_{\text{зад}}) - \hat{a}_{x4}$;

$\hat{v}_2 \triangleq a_{\phi1}^m \dot{\phi} + (a_{\phi2}^m - \hat{a}_{\phi2})\Phi - \hat{a}_{\phi3}\dot{x} - \hat{a}_{\phi4}$;

$\omega_{\phi}^m > \sqrt{-\hat{a}_{x2}\hat{a}_{\phi1}/\hat{a}_{x1}}$.

Рассмотрим сходимость невязки идентификации любой из строк системы (3) в замкнутом контуре системы управления. Для этого исключим из рассмотрения тривиальные случаи, когда $y_i = 0$. Также примем, что норма вектора оценок ограничена – утверждение, основанное на том, что в качестве алгоритма идентификации используется вариант метода наименьших квадратов. Последний обладает наилучшей скоростью сходимости оценок, аппроксимирующих отклик при корректности назначения регрессоров. Они, в свою очередь, в своей основной части соответствуют структуре математической модели объекта управления.

Умножим первое равенство (8) на ненулевой вектор y_i^T слева, прибавим к левой и правой части полученного слагаемое $(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)$, далее, разлагая на составные части последнее в правой части по второму равенству (8) и упрощая зависимость, найдем:

$$\varepsilon_{i+1} - (1 - \rho_i)\varepsilon_i = (z_{i+1} - z_i) - (y_{i+1} - y_i)^T \hat{\theta}_i,$$

$$\rho_i \triangleq y_i^T P_{i-1} y_i. \quad (11)$$

Можно показать, что скалярная величина ρ_i в ходе работы алгоритма (8) уменьшается со зна-

чения $(1 - \alpha_1)$ до α_2 , где α_1 и α_2 – малые положительные числа тем меньшие, чем меньше величины \mathcal{G}^{-1} и $|1 - \beta|$ соответственно. Это следует из того, что по [16] матрица P_i , формируемая алгоритмом (8), описывается также как

$$P_i^{-1} = \sum_{k=1}^i (\mathcal{G}^{-1} + y_i y_i^T) \beta^{i-k}.$$

Поэтому со временем норма матрицы P_i уменьшается и исходное утверждение легко доказывается, когда y – скаляр, а также аналогично доказывается и для многомерного случая путем рассмотрения собственных чисел матрицы P_i . Поэтому уравнение (11) можно рассматривать как описание дискретного динамического звена, где левая часть описывает «собственное устойчивое его движение» по ε , а правая – возмущение этого движения.

Очевидно, что если переменные z и y не привязаны к закону управления, то уменьшением шага Δt всегда можно сделать меньшими нормы разниц в правой части (11): $\|z_{i+1} - z_i\|$ и $\|y_{i+1} - y_i\|$, а значит, уменьшить всю правую часть уравнения (11). Тогда «собственное движение» ε является диссипативно устойчивым, причем с уменьшением Δt область притяжения становится более узкой, а скорость сходимости ε – выше. При этом «собственная частота» ε обратно пропорциональна Δt [15].

Однако в условиях замкнутой системы управления, когда на каждом шаге управление изменяется, уменьшение Δt приводит к пропорциональному росту скорости управления и других регрессоров, а значит, указанный вывод несправедлив. Вернуться к исходному выводу можно, если управление фильтровать на низкочастотном фильтре, достаточно хорошо подавляющем высокочастотное «собственное движение» ε (это же улучшает аппроксимационные свойства алгоритмов (6) и (10)). Конечно, указанный фильтр вносит фазовые запаздывания в полезный сигнал, но поскольку частота среза этого фильтра достаточно высока (обычно Δt на 1-3 порядка меньше периодов рабочих частот объекта управления), сопутствующая фазовая задержка не будет критичной. Тем более что рассматриваемая система «тележка – маятник» по угловому перемещению является устойчивой. Как показывает опыт, в рассматриваемой задаче можно подобрать фильтр с нужными свойствами подавления высокочастотных составляющих, не вносящий ощутимые погрешности в качество управления. Приведенный ниже пример иллюстрирует это.



Как показано в работах [12, 13], для исключения высокочастотной неустойчивости ε в замкнутой системе управления необходимым условием с использованием фильтра низких частот является выполнение условий:

$$\begin{aligned} \text{sign}(\hat{a}_{x1}) &= \text{sign}(a_{x1}), \\ |\hat{a}_{x1}| > 0.5|a_{x1}|, \hat{a}_{x1}(t) &\rightarrow \text{const} \end{aligned} \quad (12)$$

Эти соотношения предъявляют достаточно простые требования к точности получения указанной оценки. В частности, их можно выполнить на основе исходной априорной информации о параметрах исходного объекта. Так, из поставленной задачи следует, что момент инерции груза относительно точки подвеса (особенно на максимальной длине троса) равен $(m_2 l^2 + J) \approx m_2 l^2$, т. е. центральным моментом груза (J) можно пренебречь. Тогда из (1), (3) и (7) следует

$$a_{x1} \approx m_1^{-1}, \quad \omega_{\varphi}^{\text{кр}} \approx \sqrt{\frac{g m_2}{l m_1}}. \quad (13)$$

Следовательно, из приблизительной априорной информации о массе тележки (m_1) и в соответствии с (12) можно просто назначить оценку \hat{a}_{x1} постоянной и исключить ее из идентификации путем переноса с парным регрессором в отклик. Отсюда также достаточно просто выбирается собственная частота эталонной модели $\omega_{\varphi}^{\text{м}}$ – величина $\sqrt{g/l}$ является собственной частотой колебания груза с неподвижным основанием. С учетом этого, а также физики процесса управления частоты эталона целесообразно назначить в соответствии с неравенством:

$$\omega_x^{\text{м}} < \omega_{\varphi}^{\text{кр}} < \omega_{\varphi}^{\text{м}}. \quad (14)$$

Также необходимо коэффициент затухания $\xi_x^{\text{м}}$ установить на значениях, допускающем небольшое перерегулирование, это улучшает стабилизацию углового движения в конце переходного периода.

В заключение теоретической части следует сделать три дополнительных замечания. Во-первых, для устойчивости алгоритма (8) необходимо в него добавить процедуру защиты от линейной зависимости факторов на вырожденных движениях объекта, например, путем ограничения диагональных элементов матрицы P и обеспечения ее положительной определенности.

Во-вторых, более практичной задачей является не слежение за перемещением тележки, а контроль перемещения груза по оси x на максимальной длине троса. Для реализации этого в предложенном выше решении нужно вместо $x_{\text{зад}}$

использовать величину $(x_{\text{зад}} - l_{\text{max}} \sin \varphi_{\text{нч}}) \approx (x_{\text{зад}} - l_{\text{max}} \varphi_{\text{нч}})$, где l_{max} – максимальная длина троса; $\varphi_{\text{нч}}$ – низкочастотная часть угла отклонения груза.

В-третьих, удобней вместо определения $\ddot{\varphi}$ использовать акселерометр, укрепленный на точке, рядом с грузом, измеряющий тангенциальное ускорение (a_{τ}). Тогда второе из равенств (2) будет

$$a_{\tau} = l\ddot{\varphi} = -l\chi^{-1} [m_2 l \cos \varphi \mu_1 + (m_1 + m_2) \mu_2],$$

что не меняет принципа построения рассмотренного выше решения.

Результаты модельных исследований.

Примем следующие параметры объекта управления: $m_1 = 2000$ кг; $m_2 = 1500 \dots 2500$ кг; $l = 1 \dots 7$ м; $J = 500 \dots 800$ кг·м²; $k_x = 300$ кг/с; $f_{\text{с.тр}} = 1000$ Н (ступенчатое воздействие при $t = 20$ с); $f_{\text{вет}} = 1000$ Н (ступенчатое воздействие при $t = 30$ с); максимальное значение $\varphi_{\text{зад}}$ ограничено 10 градусами; вместо $x_{\text{зад}} = 10$ м используется величина $(x_{\text{зад}} - l_{\text{max}} \varphi_{\text{нч}})$, низкочастотная часть угла отклонения груза формировалась на апериодическом звене с постоянной времени 5 с. Параметры эталонной модели в соответствии с (13) и (14): $\omega_x^{\text{м}} = 0.5$ с⁻¹; $\omega_{\varphi}^{\text{м}} = 30$ с⁻¹; $\xi_x^{\text{м}} = 0,6$; $\xi_{\varphi}^{\text{м}} = 0,8$. Параметры алгоритма идентификации (8) и закона управления (10): $\Delta t = 0.01$ с; $\vartheta = 10$; $\beta = 0,995$; $\hat{a}_{x1} = 3 \cdot 10^{-4}$ кг⁻¹ = const (истинное значение $5 \cdot 10^{-4}$ кг⁻¹); синтезированный закон управления фильтруется на апериодическом звене с постоянной времени 0,5 с. Считаем, что измерения переменных зашумлены гауссовскими шумами с нулевым средним со среднеквадратичными отклонениями (в соответствии с принятыми датчиками): по измерению $\ddot{x} - 0,1$ мс⁻²; \dot{x} – определяется путем интегрирования измеренного \ddot{x} ; считаем, что x измеряется точно; по измерению $\ddot{\varphi} - 0,04$ с⁻²; по $\dot{\varphi} - 0,002$ с⁻¹; φ – определяется путем интегрирования измеренного $\dot{\varphi}$. Моделирование проводилось в среде Matlab.

На рис.2 представлены данные функционирования замкнутой системы управления при $m_2 = 2500$ кг, $J = 800$ кг·м², длина троса в процессе управления вначале уменьшается с 7 до 3 м, затем увеличивается до 7 м (см. рис. 2), остальные параметры, как указано выше.

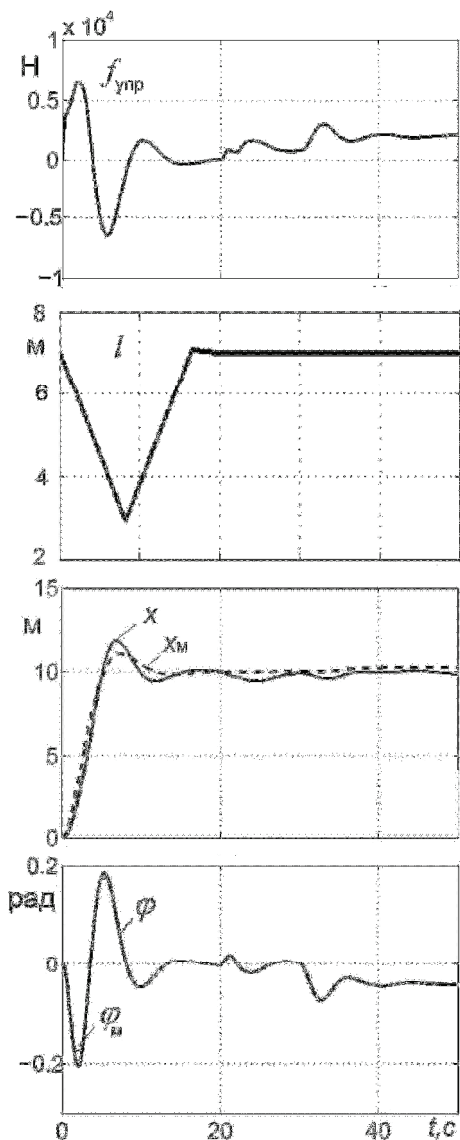


Рис. 2. Замкнутая система управления с переменной длиной троса

На рис. 3 изображен процесс идентификации первой строки (3). Можем наблюдать, что система управления при априорной неопределенности о параметрах математической модели объекта управления, влиянии неконтролируемых возмущений и помех датчиков выполняет возложенные на нее функции – поведение по линейному перемещению тележки и углу отклонения груза практически совпадает с эталонными (на рисунке отмечены индексом «м»). При этом текущие оценки не совпадают со своими точными значениями, а невязка идентификации быстро сходится к нулю. Это подтверждает указанные выше выводы. Уменьшение уровня помех датчиков и внешних возмущений улучшает точность управления.

Приблизительно такие же результаты были получены и при других вариациях исходных условий в рамках указанных диапазонов.

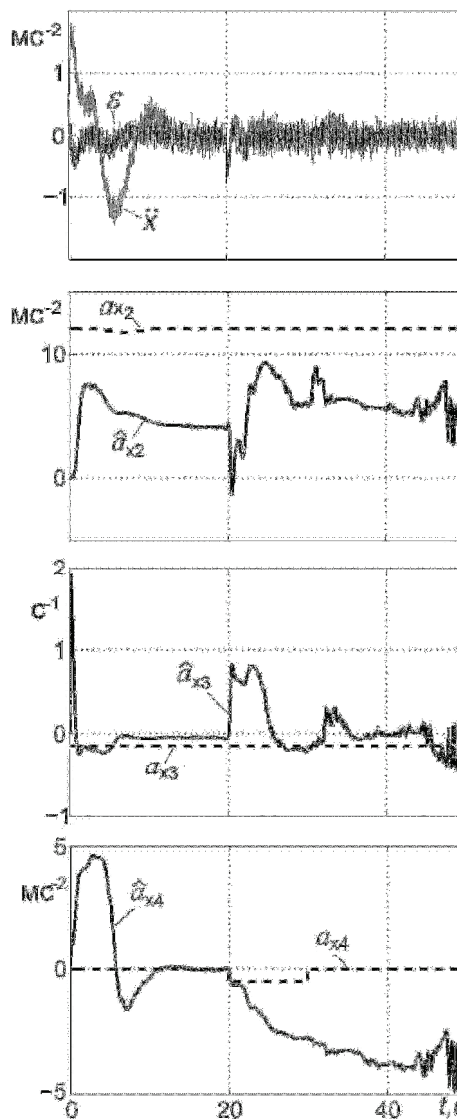


Рис. 3. Работа алгоритма текущей идентификации

Заключение

Приведенные теоретические выкладки и результаты моделирования указывают на высокую эффективность построения системы управления по предложенному подходу – система в априорно неопределенных условиях очень быстро подстраивается к неизвестным параметрам объекта управления и внешним неконтролируемым возмущениям, хотя оценки неизвестных параметров объекта управления далеки от точных значений. При этом система достаточно быстро гасит колебания груза – после начала движения и при действии ступенчатых внешних возмущений, обеспечивает высокую точность позиционирования груза с погрешностью в установившемся режиме не более 0,3 м. Задача по перемещению груза реализуется за короткий промежуток времени менее 20 с.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abdel-Rahman E.M., Nayfeh A.H., Masoud Z.N. Dynamics and Control of Cranes: A Review. *Journal of Vibration and Control*. 2003. Vol. 9. Pp. 863–908.
2. Инструкция по эксплуатации DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Siemens AG, 2002. 363 с.
3. Алави С.Э., Петренко Ю.Н. Контроллер нечеткой логики на основе генетических алгоритмов для электропривода тележки подъемного крана // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ*. 2009. № 2. С. 17–22.
4. Управление перемещением груза мостовым краном по методу обратных задач динамики / С.А. Кабанов и др. // *Изв. вузов. Сер.: Приборостроение*. 2011. № 12. Т. 5. С. 30–33.
5. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М. : Физматлит, 2006. 328 с.
6. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В., Мигунов Д.В. Ограничение колебаний груза, перемещаемого мостовыми кранами // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6. С. 268–272.
7. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В. Способы определения параметров грузов, перемещаемых мостовыми кранами с системой автоматического успокоения колебаний // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 7. С. 79–84.
8. Рогова Н.С., Юркевич В.Д. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // *Сб. науч. тр. НГТУ*. 2015. № 3(81). С. 43–54.
9. Luo B., Shao Z., Xu Z., Zhao J., Zhou L., A new model predictive controller with swarm intelligence implemented on FPGA, in 14th Int. Symposium on Advanced Control of Industrial Processes. Hangzhou. China, 2011. Pp. 427–432.
10. Kapernick B., Graichen K., Model predictive control of an overhead crane using constraint substitution, *Proceedings of American Control Conference*. Washington : DC, 2013. Pp. 3973–3978.
11. Smoczek J., Experimental verification of a GPC-LPV method with RLS and P1-TS fuzzy based estimation for limiting the transient and residual vibration of a crane system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015. Vol. 62-63, Pp. 324–340.
12. Бронников А. М., Круглов С. П. Упрощенные условия адаптируемости системы управления с идентификатором и эталонной моделью // *Автоматика и Телемеханика*. 1998. № 7. С. 107–117.
13. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном: монография // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbuckten, Deutschland. 2012. 125 с.
14. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013. 54 p. URL: www.invensense.com. (access date: 22.08.2017).
15. Первозванский А.А.. Курс теории автоматического управления. СПб. : Лань, 2015. 624 с.
16. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя : пер. с англ. М. : Наука, 1991. 432 с.

REFERENCES

1. Abdel-Rahman E.M., Nayfeh A.H., Masoud Z.N. Dynamics and Control of Cranes: A Review. *Journal of Vibration and Control*, 2003, Vol. 9, pp. 863–908.
2. Operational manual “DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70”. Siemens AG, 2002, 363 p.
3. Alavi S.E., Petrenko Yu.N. Kontroller nechetkoi logiki na osnove geneticheskikh algoritmov dlya elektroprivoda telezhki pod"emnogo kрана [Controller of fuzzy logic based on genetic algorithms for electric drive of the crane truck]. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG* [Power engineering. Bulletin of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2009, No. 2, pp. 17–22.
4. Kabanov S.A. et al. Upravlenie peremeshcheniem gruzа mostovym kranom po metodu obratnykh zadach dinamiki [Controlling the movement of goods by a bridge crane using the inverse dynamics problem method]. *Izv. vuzov. Ser.: Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2011, No. 12, Vol. 5, pp. 30–33.
5. Chernous'ko F.L., Anan'evskii I.M., Reshmin S.A. Metody upravleniya nelineinymi mekhanicheskimi sistemami [Methods of control of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006, 328 p.
6. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V., Migunov D.V. Ogranichenie kolebanii gruzа, peremeshchaemogo mostovymi kranami [Limitation of the vibrations of cargo transported by overhead cranes]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, No. 6, pp. 268–272.
7. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V. Spособы opredeleniya parametrov gruzov, peremeshchaemykh mostovymi kranami s sistemoi avtomaticheskogo uspokoeniya kolebanii [Ways to determine the parameters of the goods transported by overhead cranes with the system of automatic oscillation stabilization]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, No. 7, pp. 79–84.
8. Rogova N.S., Yurkevich V.D. Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshcheniya gruzа portal'nym kranom [Development of control algorithms for moving cargo by a portal crane]. *Sb. nauch. tr. NGTU* [Sbornik nauchnykh trudov NGTU], 2015, No. 3(81), pp. 43–54.
9. Luo B., Shao Z., Xu Z., Zhao J., Zhou L., A new model predictive controller with swarm intelligence implemented on FPGA. *14th Int. Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*. Hangzhou. China, 2011, pp. 427–432.
10. Kapernick B., Graichen K., Model predictive control of an overhead crane using constraint substitution. *Proceedings of American Control Conference*. Washington: DC, 2013, pp. 3973–3978.
11. Smoczek J., Experimental verification of a GPC-LPV method with RLS and P1-TS fuzzy based estimation for limiting the transient and residual vibration of a crane system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, Vol. 62-63, pp. 324–340.



12. Bronnikov A. M., Kruglov S. P. Uproshchennye usloviya adaptiruемости системы управления с идентификатором и эталонной моделью [Simplified conditions for the adaptability of a control system with an identifier and a reference model]. *Avtomatika i Telemekhanika* ["Automation and Remote Control"], 1998, No. 7, pp. 107–117.
13. Kruglov S.P. Usloviya adaptiruемости систем управления с идентификатором и эталоном: монография [Conditions for the adaptability of control systems with an identifier and a standard: a monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland, 2012, 125 p.
14. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense Publ., 2013, 54 p. URL: www.invensense.com. (access date: 22.08.2017).
15. Pervozvanskiy A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya [Course of the theory of automatic control]. St. Peterburg: Lan' Publ., 2015, 624 p.
16. Ljung L. System identification: Theory for the User. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1987, 679 p. (Russ. ed.: L'yung L. Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya : per. s angl. Moscow: Nauka Publ., 1991, 432 p.).

Информация об авторах

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

Ковыршин Сергей Владимирович - к. т. н., доцент, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkpw@mail.ru

Ведерников Иван Евгеньевич - аспирант факультета «Транспортные системы», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: new.my.life@mail.ru

Authors

Sergey Petrovich Kruglov – Doctor of Engineering Science, Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Sergey Vladimirovich Kovyrshin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkpw@mail.ru

Ivan Evgenievich Vedernikov – Ph.D. student, the Department of Transport Systems, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: new.my.life@mail.ru

Для цитирования

Круглов С. П. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, И. Е. Ведерников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - Т. 56, № 4. - С. 114–122. - DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).114-122.

Kruglov S. P., Kovyrshin S. V., Vedernikov I. E. Adaptivnoe upravlenie peremeshcheniem gruzha mostovym kranom s identifikatsionnym algoritmom [The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No. 4, pp. 114–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).114-122.

For citation

УДК 519.688

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).122-131

Ю. М. Краковский¹, А. Н. Лузгин²

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

² Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 сентября 2017 г.

ИНТЕРВАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация. В работе проведена формализация, программная реализация и проверка точности интервального прогнозирования реальных динамических показателей с различными статистическими характеристиками на основе методов логистической регрессии без регуляризации и с регуляризацией значений параметров. Интервальное прогнозирование динамических показателей заключается в определении принадлежности их будущих значений заранее введённым интервалам на основе оценок вероятностей. Так как при таком прогнозировании мы определяем не само будущее значение показателя, а интервал, в котором оно будет находиться, мы назвали такой метод прогнозирования «интервальным прогнозированием». Для проверки точности интервального прогнозирования мы использовали реальные динамические показатели с различными статистическими характеристиками, зависящими от стационарности по параметру положения и масштаба. Для проверки неизменности значения параметра положения с течением времени мы использовали модифицированный критерий сдвига Краскела - Уоллиса, а для проверки неизменности значения параметра масштаба мы использовали модифицированный критерий Флигнера-Киллина. В результате проведенного исследования в большинстве случаев для динамических показателей с различными статистическими характеристиками модель логистической регрессии без регуляризации продемонстрировала лучшую точность