

УДК 621.874; 681.51

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-34-44

Адаптивное управление мостовым краном при переносе длинномерного вертикально расположенного груза*

С.П. Круглов, С.В. Ковыршин

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Bridge crane adaptive control in transferring a long vertically positioned load

S.P. Kruglov, S.V. Kovyrshin

Irkutsk State Transport University

Рассмотрена задача автоматизации управления тележкой мостового крана при переносе длинномерного груза с вертикальным расположением в условиях частичной неопределенности в текущем времени параметров системы управления, груза и неконтролируемых возмущений. К таким задачам относится транспортирование свай на строительных объектах, роторов турбин на гидроэлектростанциях и других конструкций при необходимости точного позиционирования нижнего края переносимого груза в целевой точке. Предложено решение задачи на основе двухмаятниковой модели подвесной системы мостового крана с непосредственным отслеживанием перемещения груза. Для построения адаптивного управления использована схема с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной модели и «упрощенных» условий адаптируемости. На основе анализа устойчивости замкнутой системы управления определены требования к эталонной модели. Приведены результаты модельных исследований предлагаемого решения при большой вариации параметров переносимого груза и системы управления, действия возмущений и шумов датчиков информации.

Ключевые слова: мостовой кран, автоматизация управления, адаптивное управление, алгоритм текущей параметрической идентификации, устойчивость системы управления

The paper considers a problem of automating control over the bridge crane trolley when transferring a long vertically positioned load under conditions of partial uncertainty in the current time of the control system parameters, load and uncontrolled disturbances. Such problems include transporting piles at the construction sites, turbine rotors at the hydroelectric power plants and other structures, where it is necessary to accurately position the transported load lower edge at the target point. A solution to the problem is proposed based on the two-pendulum model of the bridge crane suspension system with direct monitoring of the load motion. To build the adaptive control system, a scheme was introduced with an algorithm of current parametric identification, an implicit reference model and the “simplified” adaptability conditions. Based on analyzing stability in the closed-loop control system, requirements to the reference model were determined. Results of the proposed solution model studies are presented with significant variations in the transported load and control

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00654, <https://rscf.ru/project/23-29-00654>.

system parameters and under action of disturbances and noise from the information sensors.

Keywords: bridge crane, control automation, adaptive control, current parametric identification algorithm, control system stability

Автоматизация управления мостовым краном (далее кран) при переносе крупногабаритных и длинномерных грузов в вертикальном положении (например, свай на строительных объектах и роторов турбин на гидроэлектростанциях) позволяет с заданной точностью позиционировать нижний край груза в назначенной (целевой) точке.

Для достижения высокой производительности крана, необходимо обеспечить высокую точность позиционирования груза — минимальное время на его транспортирование. Также с учетом действия реальных факторов необходимо парировать внешние возмущения: ветровое воздействие, переменное трение для перемещения тележки и др. В силу разнообразия переносимых грузов и неконтролируемости внешних возмущений имеет место текущая параметрическая неопределенность [1].

В большей части работ, посвященных автоматизации управления краном, например, [2–5], рассмотрен типовой подход, когда подвес груза смоделирован одномаятниковой системой. Однако во многих случаях одномаятниковая модель не может описать динамику переносимого груза с достаточной точностью. Поэтому в некоторых работах, в частности [6–9], используют двухмаятниковую систему подвеса груза. Она включает в себя два маятника: первый — от подвеса на тележке крана до крюка, второй — от крюка до центра масс (ЦМ) переносимого груза.

Работы [1–4, 6–9] требуют либо априорную информацию о параметрах крана и переносимого груза, либо предварительную настройку системы управления и отсутствие возмущений. Методы адаптивного управления в основном построены на функции Ляпунова и связаны с проблемой подбора параметров градиентного алгоритма для настройки параметров закона управления в конкретных случаях.

В статье [5] приведено решение по адаптивному управлению тележкой крана с прямым непосредственным отслеживанием перемещения груза на основе схемы управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной модели и так называемых упрощенных условий адаптируемости.

Решение позволяет относительно просто построить управление краном в условиях текущей параметрической неопределенности.

В работе [10] это решение распространено на двухмаятниковую модель подвеса груза с управлением по заданной скорости перемещения тележки крана. Полученное решение увязано с прямым отслеживанием перемещения крюка и косвенным управлением передвижением груза в горизонтальной плоскости. Такой подход может давать большие погрешности, когда ЦМ груза значительно отдален от крюка.

Цель работы — реализация указанного подхода при прямом отслеживании перемещения ЦМ и нижней точки груза с обеспечением необходимой точности позиционирования последней в целевой точке.

Математическая модель и задача управления.

Рассмотрим математическое описание крана с двухмаятниковым подвесом длинномерного груза при его движении по одной оси (рис. 1). Полагаем, что тросовые соединения не имеют массы и момента инерции, а угловые движения — сопротивлений.

Введем следующие обозначения: m_t , m_k и m_r — масса тележки, крюка и переносимого груза соответственно; J_k и J_r — центральные осевые моменты инерции крюка и груза, $J_k = m_k r_k^2$, $J_r = m_r r_r^2$ (r_k и r_r — радиусы инерции крюка и груза); l_k — длина подвеса крюка

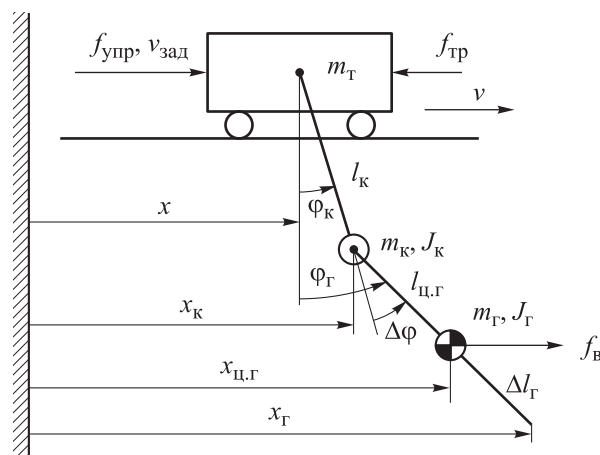


Рис. 1. Схема двухмаятниковой механической системы подвеса длинномерного груза

или расстояние от точки крепления подвеса на тележке до центра крюка; $l_{ц.г}$ — длина подвеса груза (расстояние от центра крюка до ЦМ груза); $\Delta l_{г}$ — длина груза от его ЦМ до нижнего края; x — горизонтальное перемещение тележки; v и $v_{зад}$ — скорость перемещения тележки и ее заданное значение, $v = \dot{x}$; $f_{упр}$ — управляющая сила, формируемая приводом тележки; $f_{тр}$ — сила трения, противодействующая перемещению тележки, $f_{тр} = k_{тр}v + \xi_{тр}$ ($k_{тр}$ — коэффициент вязкого трения; $\xi_{тр}$ — случайная составляющая силы трения); $f_{в}$ — сила ветрового воздействия, приложенная в ЦМ груза; $\varphi_{к}$ и $\varphi_{г}$ — углы отклонения подвесов крюка и груза от вертикальной оси; $\Delta\varphi$ — угол отклонения подвеса груза относительно подвеса крюка, $\Delta\varphi = (\varphi_{г} - \varphi_{к})$; $x_{к}$, $x_{ц.г}$ и $x_{г}$ — горизонтальное перемещение крюка, ЦМ груза и его нижней точки соответственно,

$$x_{к} = x + l_{к} \sin \varphi_{к}; \quad x_{ц.г} = x_{к} + l_{ц.г} \sin \varphi_{г}; \\ x_{г} = x_{к} + (l_{ц.г} + \Delta l_{г}) \sin \varphi_{г}.$$

В работе [10] на основе уравнений Эйлера — Лагранжа для неконсервативных систем, теоремы Пуансо и последующих преобразований показано, что эту механическую систему можно описать линеаризованной системой дифференциальных уравнений.

При условии, что угловые движения обеих подвесов обычно имеют достаточно малые амплитуду и скорость, можно записать

$$\cos \varphi_{к} \approx 1; \quad \cos \varphi_{г} \approx 1; \quad \cos \Delta\varphi \approx 1; \quad \sin \varphi_{к} \approx \varphi_{к}; \\ \sin \varphi_{г} \approx \varphi_{г}; \quad \sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi; \quad \dot{\varphi}_{к}^2 \sin \varphi_{к} \approx 0; \\ \dot{\varphi}_{к}^2 \sin \varphi_{к} \approx 0; \quad \dot{\varphi}_{г}^2 \sin \varphi_{г} \approx 0; \quad \dot{\varphi}_{г}^2 \sin \Delta\varphi \approx 0; \\ \dot{\varphi}_{к}^2 \sin \Delta\varphi \approx 0.$$

Линеаризованная система дифференциальных уравнений для рассматриваемой механической системы принимает вид

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_x^{\dot{x}} \dot{x} + a_x^{\varphi_{к}} \varphi_{к} + a_x^{\varphi_{г}} \varphi_{г} + a_x^1 + a_x^{f_{упр}} f_{упр}; \\ \ddot{\varphi}_{к} \approx a_{\varphi_{к}}^{\dot{x}} \dot{x} + a_{\varphi_{к}}^{\varphi_{к}} \varphi_{к} + a_{\varphi_{к}}^{\varphi_{г}} \varphi_{г} + a_{\varphi_{к}}^1 + a_{\varphi_{к}}^{f_{упр}} f_{упр}; \\ \ddot{\varphi}_{г} \approx a_{\varphi_{г}}^{\dot{x}} \dot{x} + a_{\varphi_{г}}^{\varphi_{к}} \varphi_{к} + a_{\varphi_{г}}^{\varphi_{г}} \varphi_{г} + a_{\varphi_{г}}^1 + a_{\varphi_{г}}^{f_{упр}} f_{упр}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

$$a_x^{\dot{x}} = -\gamma^{-1} k_{тр} [(J_{к} + m_{к} l_{к}^2)(J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} l_{к}^2 J_{г}]; \\ a_x^{\varphi_{к}} = \gamma^{-1} (m_{к} + m_{г}) g l_{к}^2 [m_{к} (J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}]; \\ a_x^{\varphi_{г}} = \gamma^{-1} g m_{г}^2 l_{ц.г}^2 J_{к}; \\ a_x^1 = -\gamma^{-1} \{ [(J_{к} + m_{к} l_{к}^2)(J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} l_{к}^2 J_{г}] \xi_{тр} + \\ + m_{г} l_{ц.г}^2 J_{к} f_{в} \};$$

$$a_x^{f_{упр}} = \gamma^{-1} [(J_{к} + m_{к} l_{к}^2)(J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} l_{к}^2 J_{г}]; \\ a_{\varphi_{к}}^{\dot{x}} = \gamma^{-1} k_{тр} l_{к} [m_{к} (J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}]; \\ a_{\varphi_{к}}^{\varphi_{к}} = -\gamma^{-1} (m_{к} + m_{г}) g l_{к} \times \\ \times [(m_{г} + m_{к})(J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}]; \\ a_{\varphi_{к}}^{\varphi_{г}} = \gamma^{-1} g m_{г} l_{к} m_{г}^2 l_{ц.г}^2; \\ a_{\varphi_{к}}^1 = \gamma^{-1} \{ l_{к} [m_{к} (J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}] \xi_{тр} - \\ - m_{г} m_{г} l_{к} l_{ц.г}^2 f_{в} \}; \\ a_{\varphi_{к}}^{f_{упр}} = -\gamma^{-1} l_{к} [m_{к} (J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}]; \\ a_{\varphi_{г}}^{\dot{x}} = \gamma^{-1} k_{тр} m_{г} l_{ц.г} J_{к}; \\ a_{\varphi_{г}}^{\varphi_{к}} = \gamma^{-1} (m_{к} + m_{г}) m_{г} m_{г} g l_{ц.г} l_{к}^2; \\ a_{\varphi_{г}}^{\varphi_{г}} = -\gamma^{-1} m_{г} g l_{ц.г} [m_{г} (m_{к} + m_{г}) l_{к}^2 + \\ + (m_{г} + m_{к} + m_{г}) J_{к}]; \\ a_{\varphi_{г}}^1 = \gamma^{-1} \{ m_{г} l_{ц.г} J_{к} \xi_{тр} + [m_{г} (m_{к} + m_{г}) l_{к}^2 + \\ + (m_{г} + m_{к} + m_{г}) J_{к}] l_{ц.г} f_{в} \}; \\ a_{\varphi_{г}}^{f_{упр}} = -\gamma^{-1} m_{г} l_{ц.г} J_{к};$$

где

$$\gamma = m_{г} [(J_{к} + m_{к} l_{к}^2)(J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} l_{к}^2 J_{г}] + \\ + (m_{к} + m_{г}) J_{к} J_{г} + m_{к} m_{г} l_{ц.г}^2 J_{к} > 0.$$

Поставим задачу управления тележкой крана: обеспечить скорейшее перемещение нижней точки груза в заданное положение по горизонтальной оси ($x_{г} \rightarrow x_{г}^{зад}$, где $x_{г}^{зад}$ — целевая точка) с гашением колебаний и парированием возмущений.

Предполагаем, что датчик, измеряющий перемещения груза с дистанционной передачей информации в управляющий контроллер, расположен в точке, близкой к ЦМ груза. Поэтому будем строить управление не по нижней точке груза, а по его ЦМ. Изложенное можно записать в виде следующих целевых требований:

$$x_{ц.г} \rightarrow x_{ц.г}^{зад}; \quad \dot{\varphi}_{к} \rightarrow 0; \quad \dot{\varphi}_{г} \rightarrow 0 \quad \text{или} \quad \Delta\dot{\varphi} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Здесь $x_{ц.г}^{зад}$ — заданное положение ЦМ груза,

$$x_{ц.г}^{зад} = x_{г}^{зад} - \Delta l_{г} \varphi_{г}^{н.ч},$$

где $\varphi_{г}^{н.ч}$ — низкочастотная часть сигнала $\varphi_{г}$ такая, что $\varphi_{г}^{н.ч} \approx \text{const}$ относительно основных угловых движений.

В качестве привода тележки современных кранов, как правило, применяют асинхронный электродвигатель с частотным управлением

посредством частотного преобразователя. Полагаем, что для управления приводом использовано векторное управление. В связи с этим управляющим сигналом будет являться заданная скорость перемещения тележки $v_{зад}$.

На основании изложенного опишем динамику изменения переменной $x_{ц.г}$. С учетом системы уравнений (1) и того, что

$$x_{ц.г} \approx x + l_k \varphi_k + l_{ц.г} \varphi_{г} \quad (\text{см. рис. 1}),$$

запишем

$$\ddot{x}_{ц.г} \approx \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\dot{x}} \dot{x} + \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} \varphi_k + \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} \varphi_{г} + \tilde{a}_{x_{ц.г}}^1 + \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{f_{упр}} f_{упр}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\dot{x}} &= a_x^{\dot{x}} + l_k a_{\varphi_k}^{\dot{x}} + l_{ц.г} a_{\varphi_{г}}^{\dot{x}}; \\ \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} &= a_x^{\varphi_k} + l_k a_{\varphi_k}^{\varphi_k} + l_{ц.г} a_{\varphi_{г}}^{\varphi_k}; \\ \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} &= a_x^{\varphi_{г}} + l_k a_{\varphi_k}^{\varphi_{г}} + l_{ц.г} a_{\varphi_{г}}^{\varphi_{г}}; \\ \tilde{a}_{x_{ц.г}}^1 &= a_x^1 + l_k a_{\varphi_k}^1 + l_{ц.г} a_{\varphi_{г}}^1; \\ \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{f_{упр}} &= a_x^{f_{упр}} + l_k a_{\varphi_k}^{f_{упр}} + l_{ц.г} a_{\varphi_{г}}^{f_{упр}}. \end{aligned}$$

Чтобы исключить из выражения (3) управляющую силу, выразим ее из первого равенства (1) в виде

$$f_{упр} \approx \left[\ddot{x} - a_x^{\dot{x}} \dot{x} - a_x^{\varphi_k} \varphi_k - a_x^{\varphi_{г}} \varphi_{г} - a_x^1 \right] / a_x^{f_{упр}}$$

и подставим в выражение (3).

С учетом того, что

$$\tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\dot{x}} - a_x^{\dot{x}} \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{f_{упр}} / a_x^{f_{упр}} = 0,$$

получаем

$$\ddot{x}_{ц.г} \approx a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}} \dot{v} + a_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} \varphi_k + a_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} \varphi_{г} + a_{x_{ц.г}}^1, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}} &= \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{f_{упр}} / a_x^{f_{упр}}; \quad a_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} = \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} - a_x^{\varphi_k} a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}; \\ a_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} &= \tilde{a}_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} - a_x^{\varphi_{г}} a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}; \quad a_{x_{ц.г}}^1 = \tilde{a}_{x_{ц.г}}^1 - a_x^1 a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}. \end{aligned}$$

Далее уравнение (4) будем использовать в качестве основного управляемого процесса с соответствующим воздействием в виде $v = v_{зад}$.

Построение закона управления. Как показано в работе [10], поставленную задачу при текущей параметрической неопределенности можно решить, используя схему адаптивного управления с идентификатором, назначаемой неявной эталонной моделью на основе упрощенных условий адаптируемости [11, 12].

Согласно этому подходу, назначают неявную эталонную модель движения объекта по переменной $x_{ц.г}$:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_m &= a_{m1} \dot{x}_m + a_{m0} (x_m - x_{ц.г}^{зад}); \quad x_m(t_0) = x_{ц.г}(t_0); \\ a_{m1} &= -2\omega_m \xi_m; \quad a_{m0} = -\omega_m^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_m — переменная эталонной модели, соответствующая $x_{ц.г}$; ω_m — заданная собственная частота эталона; ξ_m — относительный коэффициент затухания; t_0 — начальный момент времени.

Предполагаем, что в соответствии с эталоном (5) требуется получить эталонное движение по переменной $x_{ц.г}$ в виде

$$\ddot{x}_{ц.г} = a_{m1} \dot{x} + a_{m0} (x_{ц.г} - x_{ц.г}^{зад}). \quad (6)$$

Приравнявая правые части уравнений (4) и (6), находим заданную скорость перемещения тележки, обеспечивающую (6):

$$\begin{aligned} \frac{a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}}{-a_{m1}} \dot{v}_{зад} + v_{зад} &= (-a_{m1})^{-1} \times \\ &\times \left[a_{m0} (x_{ц.г} - x_{ц.г}^{зад}) - a_{x_{ц.г}}^{\varphi_k} \varphi_k - a_{x_{ц.г}}^{\varphi_{г}} \varphi_{г} - a_{x_{ц.г}}^1 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $v_{зад}^*$ — точное значение заданной скорости перемещения тележки, соответствующее полной информации о параметрах объекта (4).

Определим более точно значение параметра $a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}$ с учетом того, что крюк обычно является небольшим объектом, достаточно отдаленным от точки подвески ($l_k^2 \gg r_k^2$), вследствие чего выполняется соотношение $(J_k + m_k l_k^2) \approx m_k l_k^2$.

Тогда, используя пояснения к уравнениям (1), (3) и (4), можно найти максимальное значение параметра $a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}}$:

$$\begin{aligned} a_{x_{ц.г}}^{\dot{v}} &\approx \frac{J_k J_{г}}{l_k^2 [m_k (J_{г} + m_{г} l_{ц.г}^2) + m_{г} J_{г}]} = \\ &= \frac{\bar{r}_k^2}{1 + \frac{m_{г}}{m_k} \frac{\bar{r}_{г}^2}{1 + \bar{r}_{г}^2}} < \bar{r}_k^2 \ll 1, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\bar{r}_k = r_k / l_k; \quad \bar{r}_{г} = r_{г} / l_{ц.г}.$$

Установим, обеспечивает ли закон управления (7) достижение цели (2). Для простоты рассуждений считаем, что $x_{ц.г}^{зад} = \text{const}$ (из последующих выводов следует, что также можно принять $x_{ц.г}^{зад} \approx \text{const}$).

Назначим функцию Ляпунова

$$\Lambda = 0,5 \left[\dot{x}_{ц.г}^2 - a_{m0} (x_{ц.г} - x_{ц.г}^{зад})^2 \right] \geq 0.$$

Заметим, что $\Lambda = 0$ только при $\dot{x}_{ц.г} = 0$ и $x_{ц.г} = x_{ц.г}^{зад}$. В силу выражения (6) производная этой функции $\Lambda' = a_{m1} \dot{x}_{ц.г}$. Согласно форму-

ле (5), $a_{m1} < 0$, для уменьшения во времени функции Ляпунова достаточно, чтобы на подавляющей части периода колебаний выполнялось условие $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_{ц.г.})$. Определим условия достижения этого.

С учетом того, что $x_{ц.г.} \approx x + l_k \varphi_k + l_{ц.г.} \varphi_\Gamma$ (см. рис. 1) и $a_{m0} = -\omega_m^2$, уравнение (6) можно записать как

$$\begin{aligned} & \ddot{x} - a_{m1} \dot{x} - a_{m0} (x - x_{ц.г.}^{зад}) \approx \\ & \approx -l_k (\ddot{\varphi}_k + \omega_{k0}^2 \varphi_k) - l_{ц.г.} (\ddot{\varphi}_\Gamma + \omega_{\Gamma 0}^2 \varphi_\Gamma). \end{aligned}$$

Известно, что собственное колебание подвесов крюка и груза, как и любого другого маятника в принятых условиях, можно описать уравнениями [13]

$$\ddot{\varphi}_k + \omega_{k0}^2 \varphi_k = 0; \quad \ddot{\varphi}_\Gamma + \omega_{\Gamma 0}^2 \varphi_\Gamma = 0,$$

где ω_{k0} и $\omega_{\Gamma 0}$ — собственная частота первого и второго маятника соответственно.

Прибавляя к правой части предыдущего равенства эти нули, умноженные на l_k и $l_{ц.г.}$, получаем

$$\begin{aligned} & \ddot{x} - a_{m1} \dot{x} - a_{m0} (x - x_{ц.г.}^{зад}) \approx \\ & \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2) l_k \varphi_k + (\omega_{\Gamma 0}^2 - \omega_m^2) l_{ц.г.} \varphi_\Gamma \approx \\ & \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2) (x_k - x) + (\omega_{\Gamma 0}^2 - \omega_m^2) l_{ц.г.} \varphi_\Gamma. \end{aligned}$$

Выполняя дальнейшие преобразования и дифференцируя это равенство, с учетом выражений (5) можно записать

$$\begin{aligned} & \ddot{x} + 2\tilde{\xi}_m \omega_{k0} \dot{x} + \omega_{k0}^2 \dot{x} \approx \\ & \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2) \dot{x}_k + (\omega_{\Gamma 0}^2 - \omega_m^2) l_{ц.г.} \dot{\varphi}_\Gamma, \end{aligned}$$

где $\tilde{\xi}_m$ — результирующий коэффициент демпфирования, $\tilde{\xi}_m = \xi_m \omega_m / \omega_{k0}$.

Полученное уравнение описывает изменение переменной \dot{x} в соответствии с динамикой колебательного звена с собственной частотой ω_{k0} и относительным коэффициентом затухания $\tilde{\xi}_m > 0$:

$$\dot{x} \rightarrow \dot{x}_k (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2) / \omega_{k0}^2 + \dot{\varphi}_\Gamma l_{ц.г.} (\omega_{\Gamma 0}^2 - \omega_m^2) / \omega_{k0}^2.$$

В силу назначенного эталона (5) и реализованного закона управления (7) основная частота движений по переменным \dot{x}_k и $\dot{\varphi}_\Gamma l_{ц.г.}$, которые являются аддитивными частями сигнала $\dot{x}_{ц.г.}$ (см. рис. 1), будет равна ω_m . При выполнении условий $\omega_m < \omega_{k0}$ и $\omega_m < \omega_{\Gamma 0}$ переменная \dot{x} на переходных процессах будет изменяться быстрее указанных составных частей $\dot{x}_{ц.г.}$ и, соответственно, иметь на подавляющей части периода колебательных движений тот же знак, т. е. $\text{sign}(\dot{x}) \equiv \text{sign}(\dot{x}_{ц.г.})$.

Если эти условия выполнить, то функция Ляпунова будет уменьшаться во времени, а по ее указанным свойствам получим: $\dot{x}_{ц.г.} \rightarrow 0$ ($\ddot{x}_{ц.г.} \rightarrow 0$) и $x_{ц.г.} \rightarrow x_{ц.г.}^{зад}$. Тогда из выражения (6) следует, что $\dot{x} \rightarrow 0$, а из соотношения $x_{ц.г.} \approx x + l_k \varphi_k + l_{ц.г.} \varphi_\Gamma - l_k \dot{\varphi}_k + l_{ц.г.} \dot{\varphi}_\Gamma \rightarrow 0$, что в общем случае не гарантирует устойчивость углового движения: $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$, $\dot{\varphi}_\Gamma \rightarrow 0$.

Чтобы достичь устойчивости маятниковых движений, модифицируем закон управления (7) следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{a_{ц.г.}^v}{-a_{m1}} \dot{v}_{зад}^* + v_{зад}^* = (-a_{m1})^{-1} \times \\ & \times [a_{m0} (x_{ц.г.} - x_{ц.г.}^{зад}) - a_{x_{ц.г.}}^{\varphi_k} \varphi_k - a_{x_{ц.г.}}^{\varphi_\Gamma} \varphi_\Gamma - a_{x_{ц.г.}}^1] + k_\varphi \dot{\varphi}_k, \end{aligned} \quad (9)$$

где k_φ — положительный коэффициент, подбираемый так, чтобы дополнительное слагаемое $k_\varphi \dot{\varphi}_k$ в законе управления не оказывало существенного влияния на основные процессы в замкнутой системе управления.

Как было показано, при исходном законе управления (7) по завершении переходного процесса $\dot{x} \rightarrow 0$, т. е. аналогичное стремление наблюдается для правой части выражения (7). Тогда предлагаемое дополнительное слагаемое в формуле (9) породит

$$\dot{x} \approx k_\varphi \dot{\varphi}_k \approx k_\varphi (\dot{x}_k - \dot{x}) / l_k,$$

или

$$\dot{x} (1 + k_\varphi / l_k) \approx \dot{x}_k k_\varphi / l_k,$$

т. е. $\text{sign}(\dot{x}) \equiv \text{sign}(\dot{x}_k)$. Следовательно, добавочное слагаемое направлено на гашение углового движения подвеса крюка, т. е. $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$, а значит, $\dot{\varphi}_\Gamma \rightarrow 0$, что вытекает из представленных рассуждений.

Таким образом, для достижения цели управления (2) при точно известных параметрах объекта (4) необходимо обеспечить надлежащий выбор параметров эталонной модели. С учетом значения $\tilde{\xi}_m$ сформируем следующие требования к параметрам эталонной модели (5):

$$\omega_m < \omega_{k0}; \quad \omega_m < \omega_{\Gamma 0}; \quad \tilde{\xi}_m \rightarrow 1.$$

Значения указанных собственных частот можно приблизительно вычислить из соотношений (1) при отсутствии возмущений и других движений и из указанного уравнения собственного колебания маятника:

$$\omega_{k0} \approx \sqrt{a_{\varphi_k}^{\varphi_k}}; \quad \omega_{\Gamma 0} \approx \sqrt{a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_\Gamma}}. \quad (10)$$

На практике эти частоты можно приближенно определить, наблюдая за периодами колебаний двух маятников.

Так как параметры объекта управления по условию неизвестны, вместо выражения (9) используем закон управления

$$\frac{\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}}{-a_{M1}} \dot{v}_{зад} + v_{зад} = (-a_{M1})^{-1} [a_{M0} (\hat{x}_{ц,г} - x_{ц,г}^{зад}) - \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_k} \varphi_k - \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_r} \varphi_r - \hat{a}_{x_{ц,г}}^1] + k_{\varphi} \dot{\varphi}_k, \quad (11)$$

где верхний индекс « \wedge » означает оценку соответствующего элемента; $\hat{x}_{ц,г} \approx x + \hat{l}_{ц,г} \varphi_k + \hat{l}_{ц,г} \varphi_r$; $x_{ц,г}^{зад}$ — величина, определяемая на основании цели управления (2) с использованием параметров $x_{г}^{зад}$ и $\Delta l_{г}$.

При наличии в системе управления значительных задержек можно модернизировать закон управления (11) в соответствии с подходом, указанным в работе [14].

Оценки неизвестных параметров в текущем времени предлагается вычислять с помощью алгоритма Качмажа [15]

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \gamma (y_i^T y_i + \vartheta)^{-1} \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}, \quad (12)$$

где i — индекс, указывающий на дискретные моменты времени с шагом Δt , $i = 1, 2, 3, \dots$; $\hat{\theta}_i$ — вектор искомых оценок,

$$\hat{\theta}_i \triangleq [(\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_k})_i, (\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_r})_i, (\hat{a}_{x_{ц,г}}^1)_i]^T;$$

γ — скалярный коэффициент усиления алгоритма, $0 < \gamma \leq 1$; y_i — вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам, $y_i = [\varphi_{k_i}, \varphi_{r_i}, 1]^T$; ϑ — малое положительное чис-

ло, исключающее деление на ноль; ε_i — невязка идентификации; z_i — отклик объекта, $z_i = \ddot{x}_{ц,г,i} - \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}} v_{зад,i}$.

Известно, что невязка идентификации быстро сходится в область нуля и удерживается там ($\varepsilon \approx 0$). Тогда в непрерывном времени вместо выражения (4) можно записать

$$\ddot{x}_{ц,г} \approx \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}} \dot{v} + \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_k} \varphi_k + \hat{a}_{x_{ц,г}}^{\varphi_r} \varphi_r + \hat{a}_{x_{ц,г}}^1.$$

Это дает основание для записи закона (11) и выводу аналогичных свойств устойчивости при условии, что оценка $\hat{a}_{x_{г}}^{\dot{v}}$ удовлетворяет требованиям упрощенных условий адаптируемости [11, 12]

$$\text{sign}(\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}) = \text{sign}(a_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}); \quad |a_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}|/2 \leq |\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}| \leq |\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}|_{\max}; \quad d\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}/dt \rightarrow 0, \quad (13)$$

где $|\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}|_{\max}$ — верхнее ограничение оценки параметра, определяемое экспериментальным путем по качеству результирующего управления $\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}, |\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}|_{\max} \geq 2 |a_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}|$.

В связи с этим оценка $\hat{a}_{x_{ц,г}}^{\dot{v}}$ принята постоянной, заранее назначаемой с помощью соотношений (13), и исключена из алгоритма идентификации (12).

Модельный пример реализации адаптивного управления. Компьютерное моделирование проведено в среде MATLAB/Simulink/Multibody. Модель объекта и системы управления соответствовали выражениям (1), точнее — системе нелинейных дифференциальных урав-

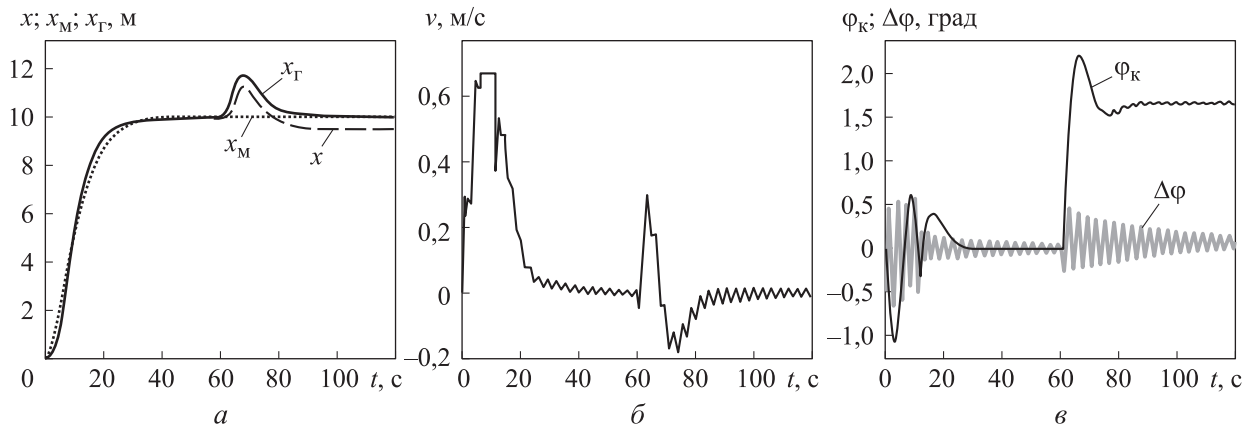


Рис. 2. Результаты исследования работы системы управления краном, переносящим груз массой $m_r = 1$ т, с абсолютно точными датчиками при длине подвеса крюка $l_k = 13$ м и радиусе инерции груза $r_r = 2,5$ м: а — зависимости перемещения тележки x , переменной эталонной модели x_M и перемещения ЦМ груза x_r от времени t ; б — зависимости скорости перемещения тележки v от времени t ; в — зависимости угла отклонения подвеса крюка от вертикальной оси φ_k и угла отклонения подвеса груза относительно подвеса крюка $\Delta\varphi$ от времени t

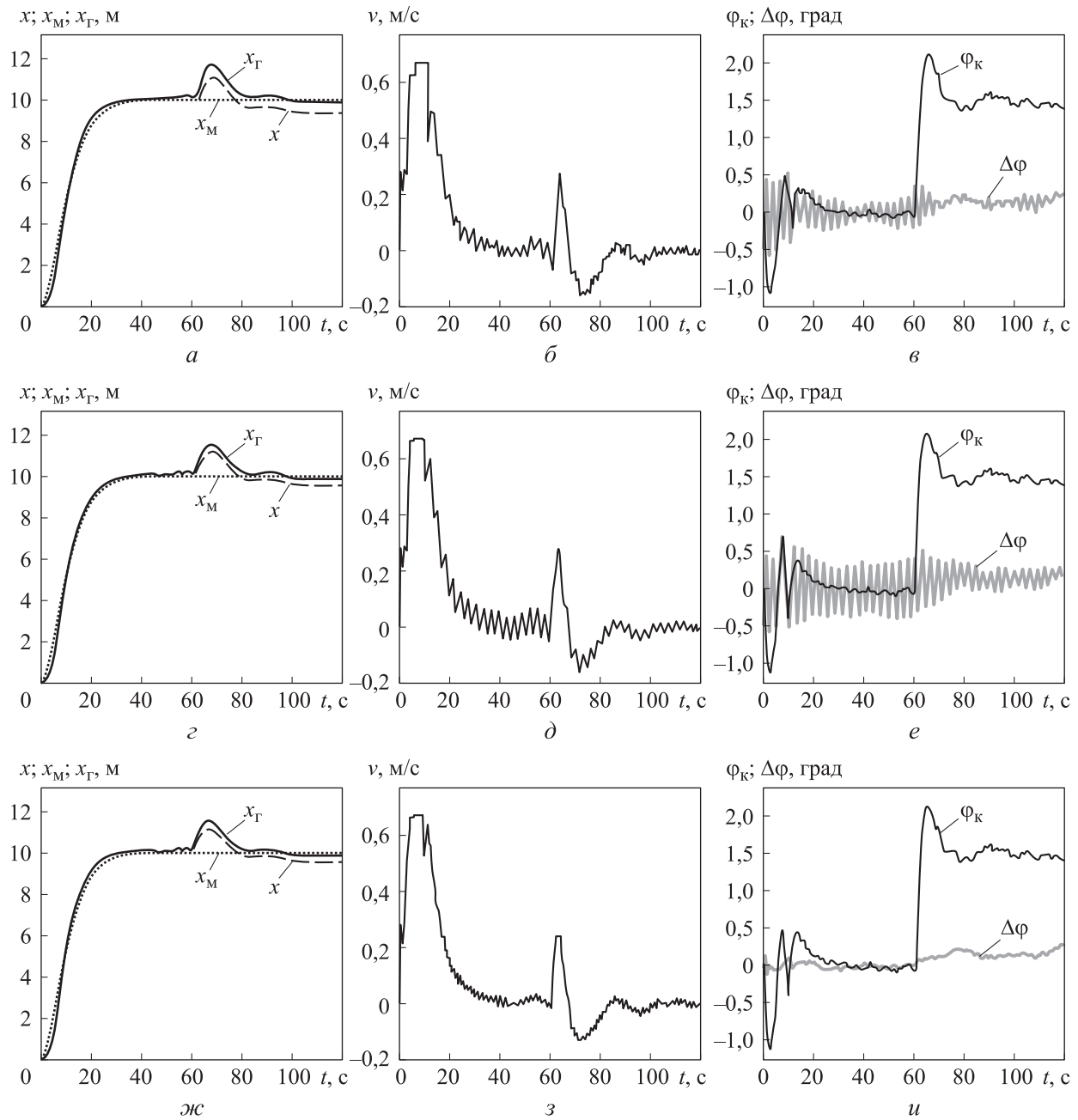


Рис. 3. Результаты исследования работы системы управления краном, переносящим груз массой $m_r = 1$ т, с выбранными характеристиками датчиков при $l_k = 13$ м и $r_r = 2,5$ м (а-б), $l_k = 5$ м и $r_r = 2,5$ м (з-е), $l_k = 5$ м и $r_r = 0,5$ м (ж-и):

а, з, ж — зависимости перемещения тележки x , переменной эталонной модели x_M и перемещения ЦМ груза x_r от времени t ;

б, д, з — зависимости скорости перемещения тележки v от времени t ;

в, е, и — зависимости угла отклонения подвеса крюка от вертикальной оси φ_k и угла отклонения подвеса груза относительно подвеса крюка $\Delta\varphi$ от времени t

нений, описывающих динамику движения механической системы согласно рис. 1 в соответствии с данными работы [10]. В модели также реализованы зависимости (5), (11), (12).

Рассмотрена задача управления перемещением тележки крана с параметрами, соответствующими стандартам [16, 17] для средних

кранов: $m_r = 400$ кг; $m_k = 43$ кг; $r_k = 0,2$ м; $l_{ц.г} = 3$ м; $\Delta l_r = 2$ м; $x_r^{\text{зад}} = 10$ м; $k_{тр} = 0,3$ Н·с/м.

Принято, что привод тележки крана реализован в виде асинхронного двигателя, управляемого частотным преобразователем с векторным методом управления, который смоделирован в виде апериодического звена с постоянной

времени 0,1 с и временной задержкой 0,01 с ограничением по выходному сигналу $|v| \leq 0,67$ м/с и $|\dot{v}| \leq 5$ м/с².

Предполагалось, что сигналы $\dot{\varphi}_k$ и $\dot{\varphi}_r$ измеряются с помощью датчиков угловых скоростей, расположенных соответственно на крюке и месте, близком к ЦМ переносимого груза (данные с датчиков передаются на управляющий контроллер дистанционно, например, по радиоканалу), аддитивно зашумленных центрированным гауссовым сигналом со среднеквадратическим отклонением (СКО) 0,1 град/с.

Сигналы φ_k и φ_r определяются интегрированием указанных сигналов угловых скоростей, сигнал $\ddot{x}_{ц.г}$ — акселерометром с аддитивным зашумлением центрированным гауссовым сигналом со СКО 0,1 м/с². Указанные характеристики соответствуют микромеханическим датчикам MPU-6050 [18] (считалось, что дрейфы датчиков угловых скоростей скомпенсированы, а акселерометр измеряет указанный сигнал).

Сигнал x имеет аналогичное зашумление со СКО 0,01 м. Принято, что $\hat{l}_{ц.г} = l_{ц.г}$, $\hat{l}_k = l_k$ и $\Delta \hat{r} = \Delta l_r$, так как ошибки этих оценок практически не влияют на динамику поведения системы управления, ухудшается лишь точность позиционирования груза относительно текущего положения тележки (относительно x).

При исследовании параметры варьировались в следующих диапазонах: длина подвеса крюка $l_k = 5...13$ м; масса груза $m_r = 1...10$ т; радиус инерции груза $r_r = 0,5...2,5$ м (что соответствует изменению момента инерции груза в 25 раз). Собственные частоты колебаний обеих маятников при вариации указанных параметров по (10) изменялись в интервалах: $\omega_{к0} \approx 1,7...9,0$ с⁻¹ и $\omega_{г0} \approx 0,9...8,6$ с⁻¹. На кран действует внешнее неконтролируемое возмущение — ветер: с момента времени 60 с груз начинает подвергаться ступенчатому воздействию интенсивностью $f_b = 300$ Н (сглаженному аperiodическим звеном с постоянной времени 1 с).

Использованы следующие параметры алгоритма идентификации (12): $\Delta t = 0,01$ с (с этим же временным шагом формировался закон управления (11)); $\gamma = 0,03$; $\vartheta = 1 \cdot 10^{-10}$. Параметры эталонной модели (5): $\omega_m = 0,17$ с⁻¹; $\xi_m = 0,95$. Назначенная оценка $\hat{a}_{x_{ц.г}}^i \equiv 0,3$. Заметим, что точное значение этого параметра согласно выражению (8) на несколько порядков

меньше. Параметр закона уравнения (11) $k_\varphi = 50$ м. Переменная $\varphi_r^{н.ч}$ получена фильтрацией сигнала φ_r на аperiodическом звене с постоянной времени 1 с.

Результаты исследования работы системы управления (управления по заданной скорости тележки) при массе груза $m_r = 1$ т, граничных значениях длины подвеса крюка l_k и радиуса инерции груза r_r приведены на рис. 2 и 3. Поведение системы управления при предположении об абсолютной точности датчиков информации для $l_k = 13$ м и $r_r = 2,5$ м показано на рис. 2. Подобное поведение замкнутой системы управления при абсолютно точных датчиках получено и для длины подвеса крюка $l_k = 5$ м и других параметров. Это исследование показывает асимптотическую устойчивость и высокую точность замкнутой системы управления с достижением цели управления (2).

Результаты исследования работы системы управления с выбранными характеристиками датчиков при различных значениях длины подвеса крюка l_k и радиуса инерции груза r_r приведены на рис. 3.

Промежуточные параметры порождают промежуточное качество управления по отношению к показанным графикам. Следует отметить, что при аналогичных параметрах и другой массе груза в выбранном диапазоне поведение замкнутой системы управления не хуже приведенных на рис. 3. Также определено, что возмущения в виде случайного изменения силы трения тележки $\xi_{тр}$ не влияют на поведение системы управления (управление по заданной скорости тележки).

Вывод

Анализ результатов исследования показал, что предлагаемая система управления мостовым краном для переноса длинномерных грузов в вертикальном положении с непосредственным отслеживанием перемещения ЦМ груза и позиционирования его нижней кромки в заданной точке в условиях текущей параметрической неопределенности, широком диапазоне вариантов переносимого груза и воздействия внешних возмущений и шумов измерений способна решать поставленные задачи и может быть использована на практике.

Литература

- [1] Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А. и др. *Грузоподъемные краны*. Москва, Машиностроение, 1986. 400 с.
- [2] Кабанов С.А., Никулин Е.Н., Якушев Б.Э. и др. Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2011, т. 54, № 5, с. 56–65.
- [3] Рогова Н.С., Юркевич В.Д. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном. *Сборник научных трудов НГТУ*, 2015, № 3, с. 43–54, doi: <https://doi.org/10.17212/2307-6879-2015-3-43-54>
- [4] Антипов А.С., Краснова С.А. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2019, т. 20, № 10, с. 609–614, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.20.609-614>
- [5] Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2020, т. 21, № 12, с. 682–688, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.682-688>
- [6] Qian D., Yi J. *Hierarchical sliding mode control for under-actuated cranes*. Springer, 2015. 199 p.
- [7] Sun N., Fang Y., Wu Y. et al. Adaptive positioning and swing suppression control of under-actuated cranes exhibiting double-pendulum dynamics: theory and experimentation. *Proc. YAC*, 2016, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1109/YAC.2016.7804870>
- [8] Зегжда С.А., Шатров Е.А., Юшков М.П. Гашение колебаний тележки с двойным маятником с помощью управления ее ускорением. *Вестник СПбГУ. Сер. 1. Математика. Механика. Астрономия*, 2016, т. 3, № 4, с. 683–688, doi: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2016.418>
- [9] Ramli L., Mohamed Z., Abdullahi A.M. et al. Control strategies for crane systems: a comprehensive review. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2017, vol. 95, pp. 1–23, doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.015>
- [10] Круглов С.П., Ковыршин С.В., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление двухмаятниковым подвесом мостового крана. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2022, т. 23, № 9, с. 451–461, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.23.451-461>
- [11] Круглов С.П. *Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном*. Lap Lambert Academic Publ., 2012. 125 с.
- [12] Круглов С.П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*, 2019, № 1. URL: https://ismm.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_shodnevyazkiidentif_0.pdf
- [13] Сивухин Д.В. *Общий курс физики. Т. 1: Механика*. Москва, Физматлит, Изд-во МФТИ, 2005. 560 с.
- [14] Бронников А.М., Круглов С.П., Максимов И.С. *Адаптивная система управления с идентификатором и неявной эталонной моделью при временных задержках информации в системе управления*. Патент РФ 2192031. Заявл. 05.02.2001, опубл. 27.10.2002.
- [15] Astrom K.J., Wittenmark B. *Adaptive control*. Dover Publ., 2008.
- [16] ГОСТ 3332–54. *Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т среднего и тяжелого режимов работы. Основные параметры и размеры*. Москва, Издательство стандартов. 1974. 8 с.
- [17] ГОСТ 6627–74. *Крюки однорогие. Заготовки. Типы. Конструкции и размеры*. Москва, Издательство стандартов. 1974. 7 с.
- [18] Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О. и др. Акселерометр и гироскоп МРУ6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике. *Автоматика и программная инженерия*, 2018, № 3, с. 9–22. URL: www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2018-1.pdf

References

- [1] Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A. et al. *Gruzopodemnye kраны* [Lifting cranes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p. (In Russ.).

- [2] Kabanov S.A., Nikulin E.N., Yakushev B.E. et al. Optimal control over load movement with bridge crane. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2011, vol. 54, no. 5, pp. 56–65. (In Russ.).
- [3] Rogova N.S., Yurkevich V.D. Design of control for load movement by overhead crane. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University], 2015, no. 3, pp. 43–54, doi: <https://doi.org/10.17212/2307-6879-2015-3-43-54> (in Russ.).
- [4] Antipov A.S., Krasnova S.A. Stabilization system of convey-crane position via sigmoidal function. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.20.609-614> (in Russ.).
- [5] Kruglov S.P., Aksamentov D.N. A method of adaptive control of an overhead crane with direct tracking of the load movement. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 682–688, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.682-688> (in Russ.).
- [6] Qian D., Yi J. *Hierarchical sliding mode control for under-actuated cranes*. Springer, 2015. 199 p.
- [7] Sun N., Fang Y., Wu Y. et al. Adaptive positioning and swing suppression control of under-actuated cranes exhibiting double-pendulum dynamics: theory and experimentation. *Proc. YAC*, 2016, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1109/YAC.2016.7804870>
- [8] Zegzhda S.A., Shatrov E.A., Yushkov M.P. Suppression of oscillation of a trolley with a double pendulum by means of control of its acceleration. *Vestnik SPbGU. Ser. 1. Matematika. Mekhanika. Astronomiya* [Vestnik of St Petersburg University. Series 1. Mathematics. Mechanics. Astronomy], 2016, vol. 3, no. 4, pp. 683–688, doi: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2016.418> (in Russ.).
- [9] Ramli L., Mohamed Z., Abdullahi A.M. et al. Control strategies for crane systems: a comprehensive review. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2017, vol. 95, pp. 1–23, doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.015>
- [10] Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Aksamentov D.N. Adaptive control of two-pendulum suspension of overhead crane. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 9, pp. 451–461, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.23.451-461> (in Russ.).
- [11] Kruglov S.P. *Usloviya adaptiruемости систем управления с идентификатором и эталоном* [Conditions for adaptability of control systems with identifier and benchmark]. Lap Lambert Academic Publ., 2012. 125 p. (In Russ.).
- [12] Kruglov S.P. Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami* [Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems], 2019, no. 1. URL: https://ismm.ircgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_shodnevnyazkiidentif_0.pdf (in Russ.).
- [13] Sivukhin D.V. *Obshchiy kurs fiziki. Vol. 1: Mechanics*, Moscow, Fizmatlit, Izd-vo MFTI, 2005. 560 p. (In Russ.).
- [14] Bronnikov A.M., Kruglov S.P., Maksimov I.S. *Adaptivnaya sistema upravleniya s identifikatorom i neyavnoy etalonnoy modelyu pri vremennykh zaderzhkakh informatsii v sisteme upravleniya* [Adaptive control system with identifier and implicit pattern model at temporary delays of information in control system]. Patent RU 2192031. Appl. 05.02.2001, publ. 27.10.2002. (In Russ.).
- [15] Astrom K.J., Wittenmark B. *Adaptive control*. Dover Publ., 2008.
- [16] ГОСТ 3332–54. *Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т среднего и тяжелого режимов работы. Основные параметры и размеры*. Москва, Издательство стандартов. 1974. 8 с.
- [17] ГОСТ 6627–74. *Крюки однорogie. Заготовки. Типы. Конструкции и размеры*. Москва, Издательство стандартов. 1974. 7 с.
- [18] Zhmud V.A., Kuznetsov K.A., Kondratyev N.O. et al. Accelerometer and gyroscope MPU6050; the first inclusion on STM32 and the study of its indications in statics. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automatics & Software Engineering], 2018, no. 3, pp. 9–22. URL: www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2018-1.pdf (in Russ.).

Информация об авторах

КРУГЛОВ Сергей Петрович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 15, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru).

КОВЫРШИН Сергей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов». ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 15, e-mail: sergkow@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Круглов С.П., Ковыршин С.В. Адаптивное управление мостовым краном при переносе длинномерного вертикально расположенного груза. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 34–44, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-34-44

Please cite this article in English as:

Kruglov S.P., Kovyreshin S.V. Bridge crane adaptive control in transferring a long vertically positioned load. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 34–44, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-34-44

Information about the authors

KRUGLOV Sergey Petrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Automation of Production Processes Department. Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Chernyshevsky St., Bldg. 15, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru).

KOVYRSHIN Sergey Vladimirovich — Candidate Science (Eng.), Associate Professor. Associate Professor of Automation of Production Processes Department. Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Chernyshevsky St., Bldg. 15, e-mail: sergkow@mail.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник под редакцией К.С. Колесникова, В.В. Дубинина «Курс теоретической механики»

Изложены кинематика, статика, динамика точки, твердого тела и механической системы; аналитическая механика; теория колебаний; теория удара; введение в динамику тел переменной массы; основы небесной механики. Приведены примеры решения задач.

Содержание учебника соответствует программе и курсу лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов машиностроительных вузов и технических университетов. Может быть полезен аспирантам и преподавателям, а также специалистам в области статики и динамики механических систем.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>