

ИДЕНТИФИКАЦИОННОЕ СКОРОСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОСТОВЫМ КРАНОМ С СОКРАЩЕННОЙ МОДЕЛЬЮ ПЕРЕНОСА ГРУЗА¹

С.П. Круглов, С.В. Ковыршин

Аннотация. Рассмотрен подход к автоматизации управления тележкой мостового крана в условиях текущей неопределенности параметров крана, переносимого груза и внешних возмущений. Он реализует формирование заданной скорости тележки, что соответствует современной аппаратной реализации управления кранами с асинхронными двигателями и частотными преобразователями. Данный подход основан на схеме управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной модели и «упрощенных» условиях адаптируемости с нацеленностью на непосредственное отслеживание перемещения груза. В качестве основы для алгоритма идентификации применяется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. В отличие от ранее опубликованных работ по рассматриваемой тематике предложено использовать сокращенную модель объекта «кран – груз» при перемещении груза по одной горизонтальной оси, что требует оценивания только двух параметров, упрощает построение алгоритма управления и улучшает качество функционирования замкнутой системы управления. Приведено доказательство устойчивости замкнутой системы управления и найдены требования к параметрам назначаемого эталонного движения. В силу свойства самоподстройки системы управления очевидны обобщения на возможность построения системы управления мостовым краном по двум горизонтальным осям и трем осям (с одновременным вертикальным перемещением груза). Приведен модельный пример, показывающий возможность реализации предлагаемой системы управления краном на основе современных контроллеров и датчиков.

Ключевые слова: автоматизация управления мостовым краном, адаптивная система управления, алгоритм параметрической идентификации, текущая параметрическая неопределенность, устойчивость замкнутой системы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы автоматизации управления кранами с подвешенным грузом, в частности мостовым краном, являются очень важными в силу массовости их использования и необходимости повышения производительности крановых работ, безопасности, снижения эксплуатационных затрат и пр. От системы управления краном требуется обеспечение максимально быстрого и точного перемещения груза в заданную точку с устранением маятникового раскачивания подвеса груза. Причины возникновения последнего могут быть разными: инерционное раскачивание при старте и останове движения, влияние ветрового воздействия на груз, волнение моря на судовых кранах и др.

При этом, как правило, современные краны характеризуются многообразием режимов работы: большой вариацией параметров переносимых грузов, длины подвеса, вероятностью появления внешних возмущений. Поэтому часто работа системы управления краном связана с текущей неопределенностью собственных характеристик, характеристик переносимого груза и внешних возмущений.

Многие работы, посвященные автоматизации управления мостовым краном, основаны на априорной информации о параметрах крана и груза либо требуют предварительной настройки системы управления. К ним относятся, например, работы, посвященные использованию ПИД- и ПД-регуляторов [1–3], систем управления на основе скользящих режимов [4–8]. Но такие системы принципиально не могут решить задачу качественного управления краном в указанном много-

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00654, <https://rscf.ru/project/23-29-00654/>.

образии режимов его работы при одной настройке. Априорная информация об объекте управления требуется при построении оптимального управления (см., например, публикации [9, 10]). Немало работ посвящается использованию нечеткой логики и нейроконтроллеров (см., например, статьи [11, 12]). Однако стратегии с нечетким управлением достаточно сложны для настройки, а также не учитывают заранее не определенные факторы. Нейроконтроллеры же требуют значительного времени для обучения.

Известны подходы к построению адаптивной системы управления краном на основе использования функции Ляпунова (см., например, статьи [13, 14]), но для настройки параметров закона управления здесь применяется градиентный алгоритм, сопряженный с проблемой подбора параметров дискретной настройки для конкретного случая.

В работах [15, 16] предложен подход по адаптивному управлению тележкой мостового крана на основе непосредственного отслеживания горизонтального перемещения груза с формированием управляющей силы или заданной скорости. Управление по заданной скорости соответствует современным подходам к управлению краном с использованием асинхронных электродвигателей и частотных преобразователей. Подход основан на схеме управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной моделью и «упрощенных» условиях адаптируемости [17]. Решение дает возможность относительно просто строить управление мостовым краном в условиях текущей неопределенности параметров крана, переносимого груза и внешних возмущений.

Настоящая статья является логическим продолжением работ [15, 16], и, в отличие от них, предлагает использовать сокращенную модель объекта «кран – груз» при перемещении груза по одной горизонтальной оси, что упрощает построение алгоритмов идентификации и управления, улучшает качество функционирования замкнутой системы управления. Также приведены доказательства устойчивости замкнутой системы управления для сформированного закона управления и требования к параметрам назначаемого эталонного движения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим одномаятниковую модель мостового крана, переносящего груз по одной горизонтальной оси. Будем пренебрегать весом троса, на котором подвешен груз, а также сопротивлением при его перемещении. Схема мостового крана при

перемещении груза по одной оси представлена на рис. 1.

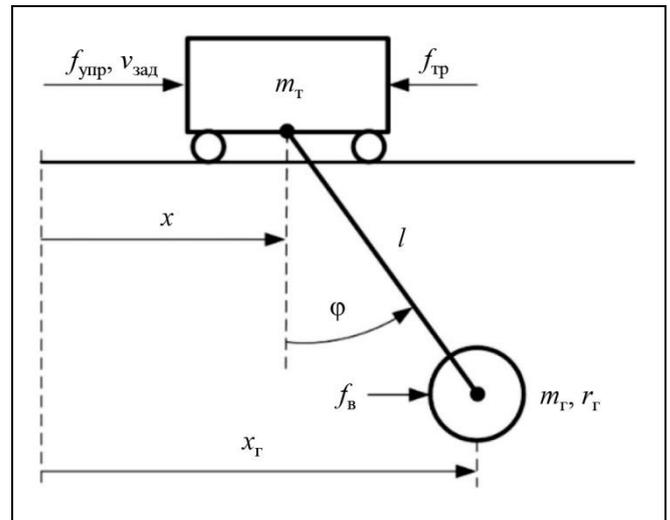


Рис. 1. Схема мостового крана при перемещении груза по одной оси

На рис. 1 обозначено m_T, m_T – массы тележки крана и переносимого груза соответственно; r_T – радиус инерции груза; l – длина подвеса груза, или расстояние от точки крепления подвеса на тележке до центра груза; x – горизонтальное перемещение тележки от назначенного положения; $\dot{x} = v$ – скорость перемещения тележки, а $v_{зад}$ – заданное значение этой скорости; $f_{упр}$ – управляющая сила, формируемая приводом тележки крана; $f_{тр} = k_{тр}v$ – сила трения, противодействующая перемещению тележки, $k_{тр}$ – коэффициент вязкого трения (ограничимся такой моделью трения без потери общности последующих выводов, что очевидно при управлении по скорости); $f_в$ – сила ветрового воздействия, приложенная в центре масс груза; φ – угол отклонения подвеса груза от вертикальной оси; $x_T = x + l \sin \varphi$ – горизонтальное перемещение груза. Будем считать, что движение тележки вместе с грузом подвергается внешнему возмущению, которое представляет изменение силы трения и ветрового воздействия, имеет ступенчатый характер с произвольным моментом времени с ограниченной интенсивностью.

Динамика движения объекта, представленного на рис. 1, достаточно хорошо изучена; без учета начального состояния по линейному и угловому перемещению и их скорости на основе уравнений Эйлера – Лагранжа она может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений (аналогично изложенному в работах [2, 6] и др.):

$$\begin{cases} (m_T + m_T) \ddot{x} + (m_T l \cos \varphi) \ddot{\varphi} = f_{\text{упр}} - k_{\text{тр}} \dot{x} + m_T l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi, \\ (m_T l \cos \varphi) \ddot{x} + m_T (l^2 + r_T^2) \ddot{\varphi} = -m_T g l \sin \varphi - l f_B \cos \varphi, \\ x_T = x + l \sin \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Поскольку угол отклонения груза небольшой (не практике не более $10 - 20^\circ$), угловая скорость также невысокая, с учетом кинематики движения можно принять $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \approx 0$. Поэтому систему (1) можно описать в линеаризованном виде так:

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_x^{f_{\text{упр}}} (f_{\text{упр}} - k_{\text{тр}} \dot{x}) + a_x^\varphi \varphi + a_x, \\ \ddot{\varphi} \approx a_\varphi^{f_{\text{упр}}} (f_{\text{упр}} - k_{\text{тр}} \dot{x}) + a_\varphi^\varphi \varphi + a_\varphi, \\ x_T \approx x + l \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_x^{f_{\text{упр}}} &= \gamma^{-1} m_T (l^2 + r_T^2); & a_x^\varphi &= \gamma^{-1} g (m_T l)^2; \\ a_x &= \gamma^{-1} m_T [- (l^2 + r_T^2) f_{\text{тр}} + l^2 f_B]; & a_\varphi^{f_{\text{упр}}} &= -\gamma^{-1} m_T l; \\ a_\varphi^\varphi &= -\gamma^{-1} (m_T + m_T) m_T g l; & a_\varphi &= \gamma^{-1} l [m_T f_{\text{тр}} - (m_T + \\ &+ m_T) f_B]; & \gamma &= m_T [m_T l^2 + (m_T + m_T) r_T^2]. \end{aligned}$$

Подставляя первое и второе уравнения в дважды продифференцированное третье равенство системы (2), выражая сигнал $(f_{\text{упр}} - k_{\text{тр}} \dot{x})$ из первого равенства (2) и подставляя его в полученный результат, определим, что движение груза можно описать через скорость тележки следующим приближенным равенством:

$$\ddot{x}_T \approx a_T^\dot{\varphi} \dot{\varphi} + a_T^\varphi \varphi + a_T, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_T^\dot{\varphi} &= r_T^2 / (r_T^2 + l^2); & a_T^\varphi &= l (a_\varphi^\varphi - a_x^\varphi a_\varphi^{f_{\text{упр}}} / a_x^{f_{\text{упр}}}) = \\ &= -g \mu, & \mu &= l^2 / (l^2 + r_T^2) - \text{безразмерный коэффициент влияния радиуса инерции груза;} \\ a_T &= l (a_\varphi - a_x a_\varphi^{f_{\text{упр}}} / a_x^{f_{\text{упр}}}). \end{aligned}$$

Для дальнейших рассуждений вначале примем утверждение, что $l^2 \gg r_T^2$, что соответствует большинству случаев практики. Тогда $a_T^\dot{\varphi} \approx 0$ и уравнение (3) можно переписать в виде

$$\ddot{x}_T \approx a_T^\varphi \varphi + a_T. \quad (4)$$

Такую линеаризованную модель переноса груза по одной оси назовем сокращенной, в сравнении с моделью (3), которая в работе [16] использовалась для синтеза адаптивного управления краном. Она

отличается тем, что содержит только два неизвестных параметра. Столь значительное упрощение модели динамики линейного перемещения груза объясняется не только приведенными доводами, но и тем, что модель (4) далее используется лишь для аппроксимации указанного движения.

Из уравнения (4) можно определить собственную частоту угловых колебаний груза (ω_0). Известно, что собственные колебания описываются уравнением [18] $\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0$. Равенство (4) можно записать как $\ddot{x} + l \ddot{\varphi} \approx a_T^\varphi \varphi + a_T$. Частота ω_0 находится при $\ddot{x} \equiv 0$ и отсутствии внешних возмущений, т. е. $a_T \equiv 0$. Следовательно, с учетом уравнения (3) получим:

$$\omega_0 \approx \sqrt{-a_T^\varphi / l} = \sqrt{\mu g / l}. \quad (5)$$

Ставится задача: в условиях текущей неопределенности параметров крана, груза и указанных возмущений сформировать закон управления в виде заданной скорости перемещения тележки крана, отработка которой приводом тележки (будем считать $\dot{x} \equiv v_{\text{зад}}$) обеспечит выполнение условия

$$x_T \rightarrow x_{T \text{ зад}}, \quad \dot{\varphi} \rightarrow 0, \quad (6)$$

где $x_{T \text{ зад}}$ – заданное положение груза, или его целевая точка. Также будем считать, что приближительная априорная информация о собственной частоте угловых колебаний имеется. В качестве датчиков информации будем использовать измерители сигналов $\dot{\varphi}$, \ddot{x}_T , x , это «по силам» современным датчикам. Так, для измерения первых двух сигналов предлагается использовать микромеханический датчик, например расположенный рядом с грузом с дистанционной передачей данных.

2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Примем в качестве следующего равенства желаемое (модельное) поведение второй производной линейного перемещения груза (\ddot{x}_T^M), соответствующее колебательному процессу, которое назовем «эталонным движением» (обоснование такого решения по сравнению с обычной эталонной моделью приведено в приложении):

$$\ddot{x}_T^M = -2\omega_M \xi_M \dot{x} - \omega_M^2 (x_T - x_{T \text{ зад}}), \quad (7)$$

где ω_M – задаваемая собственная частота эталонного движения, а ξ_M – относительный коэффициент затухания.



Приравнивая правые части уравнений (4) и (7), найдем закон управления тележкой крана в виде ее заданной скорости ($v_{\text{зад}}$):

$$\dot{x} \approx v_{\text{зад}} = -T_M^{-1} \left[(x_{\Gamma} - x_{\Gamma \text{зад}}) + \omega_M^{-2} (a_{\Gamma}^{\phi} \phi + a_{\Gamma}) \right], \quad (8)$$

где $T_M = 2\xi_M / \omega_M$ – задаваемая (модельная) постоянная времени линейного перемещения.

На основании рис. 1 ошибку слежения за положением груза можно переписать в следующем виде:

$$x_{\Gamma} - x_{\Gamma \text{зад}} = x - x_{\text{зад}}, \quad (9)$$

где $x_{\text{зад}} = x_{\Gamma \text{зад}} - l\phi_{\text{уст}} = \text{const}$, предполагая, что $\phi_{\text{уст}}$ – установившееся постоянное значение угла ϕ по окончании регулирования.

Уравнение (8) можно записать в виде зависимости, описывающей динамику замкнутой системы управления

$$T_M \dot{x} + x \approx x_{\text{зад}} - \omega_M^{-2} (a_{\Gamma}^{\phi} \phi + a_{\Gamma}). \quad (10)$$

Если бы не было углового движения ($\phi \equiv 0$) и не было возмущения ($a_{\Gamma} \equiv 0$), из выражения (10) следовало бы, что $x \rightarrow x_{\text{зад}}$ по аperiodическому закону с постоянной времени T_M (отсюда название этого параметра). В общем случае это аperiodическое движение тележки крана возмущается угловым движением и составляющей a_{Γ} [19].

Из формул (4) и (10) также следует, что если в замкнутой системе управления достигается установившееся состояние $\dot{x} \rightarrow 0$, $\dot{\phi} \rightarrow 0$, $\dot{x}_{\Gamma} \rightarrow 0$, то это может быть только в случае, когда $\phi \rightarrow \phi_{\text{уст}} = -a_{\Gamma} / a_{\Gamma}^{\phi}$ и $x \rightarrow x_{\text{зад}}$, а значит, по формуле (9) $x_{\Gamma} \rightarrow x_{\Gamma \text{зад}}$.

Утверждение. При $\omega_M < \omega_0$ для замкнутой системы управления (2), (4), (8) при $t \rightarrow +\infty$ (t – текущее время) справедливо $\dot{x} \rightarrow 0$, $\dot{\phi} \rightarrow 0$, $\dot{x}_{\Gamma} \rightarrow 0$, а значит, достигается заданная цель управления (6).

Доказательство. Для простоты рассуждений примем, что $x_{\Gamma \text{зад}} = \text{const}$ (из последующих выводов следует, что также можно принять $x_{\Gamma \text{зад}} \approx \text{const}$). Назначим функцию Ляпунова

$$\Lambda = 0,5 \left[\dot{x}_{\Gamma}^2 + \omega_M^2 (x_{\Gamma} - x_{\Gamma \text{зад}})^2 \right] \geq 0.$$

Заметим, что $\Lambda = 0$ только при $\dot{x}_{\Gamma} = 0$ и $x_{\Gamma} = x_{\Gamma \text{зад}}$.

В силу указанного приравнивания правых частей уравнений (4) и (7) производная функции Ляпунова равна

$\Lambda' = -2\omega_M \xi_M \dot{x}_{\Gamma}$. Отсюда следует, что для уменьшения во времени функции Ляпунова достаточно выполнения на подавляющей части периода колебаний условия $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_{\Gamma})$. Определим, когда оно может быть достигнуто.

С учетом третьего равенства (2) уравнение (7), где \ddot{x}_{Γ}^M заменено на \ddot{x}_{Γ} (замкнутая система управления с законом управления (8) будет описываться именно так), можно переписать в виде

$$\ddot{x} + 2\xi_M \omega_M \dot{x} + \omega_M^2 (x - x_{\Gamma \text{зад}}) \approx -l(\ddot{\phi} + \omega_M^2 \phi).$$

Прибавляя к правой части этого равенства нуль $\ddot{\phi} + \omega_0^2 \phi = 0$, умноженный на l , получим:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\xi_M \omega_M \dot{x} + \omega_M^2 (x - x_{\Gamma \text{зад}}) &\approx \\ &\approx (\omega_0^2 - \omega_M^2) l \phi \approx (\omega_0^2 - \omega_M^2) (x_{\Gamma} - x). \end{aligned}$$

Дифференцируя это равенство и выполняя дальнейшие преобразования, можно записать

$$\ddot{x} + 2\tilde{\xi}_M \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x \approx (\omega_0^2 - \omega_M^2) \dot{x}_{\Gamma},$$

где $\tilde{\xi}_M = \xi_M \omega_M / \omega_0$ – результирующий относительный коэффициент затухания.

Как известно из теории автоматического управления, полученное уравнение означает, что динамика движения тележки по переменной \dot{x} соответствует колебательному звену с собственной частотой выходного сигнала $\omega_0^{\dot{x}} = \omega_0 \sqrt{1 - \tilde{\xi}_M^2}$ и со стремлением по времени $\dot{x} \rightarrow \left[(\omega_0^2 - \omega_M^2) / \omega_0^2 \right] \dot{x}_{\Gamma}$ [19].

Потребуем выполнения условия: $\omega_M < \omega_0$. Тогда соотношение собственных частот выходного сигнала замкнутой системы управления $\omega_0^{\dot{x}}$ и назначенного эталонного движения по формуле (7) $\omega_0^M = \omega_M \sqrt{1 - \xi_M^2}$ будет следующим:

$$\omega_0^{\dot{x}} = \omega_0 \sqrt{1 - (\xi_M \omega_M / \omega_0)^2} = \omega_M \sqrt{(\omega_0 / \omega_M)^2 - \xi_M^2} > \omega_0^M.$$

Поскольку закон управления (8) нацелен на изменение переменной x_{Γ} по свойствам (7), то преобладающей частотой движений по \dot{x}_{Γ} будет собственная частота выходного сигнала эталона ω_0^M . То есть в замкнутой системе управления на переходных процессах движение по \dot{x} более быстрое, чем движение по \dot{x}_{Γ} . Отсюда и на основании изложенного следует, что \dot{x} имеет на подавляющей части периода колебательных движений тот же знак, т. е. $\text{sign}(\dot{x}) \equiv \text{sign}(\dot{x}_{\Gamma})$.

Таким образом, если $\omega_M < \omega_0$, то функция Ляпунова будет уменьшаться во времени. А по указанным ее свойствам получим: $\dot{x}_{\Gamma} \rightarrow 0$ ($\ddot{x}_{\Gamma} \rightarrow 0$) и $x_{\Gamma} \rightarrow x_{\Gamma \text{зад}}$. Тогда из формул (8) и (4) следует, что $\dot{x} \rightarrow 0$. Из зависимости $x_{\Gamma} \approx x + l\phi$ также следует, что $\dot{\phi} \rightarrow 0$. ♦

Как правило, желаемое движение груза к целевой точке представляет собой процесс, близкий к апериодическому, без перерегулирования с минимально возможным временем. Также нужно учесть, что выбор параметров T_M , или ω_M необходимо увязывать с максимальной реализуемой скоростью со стороны привода и необходимым перемещением груза. С учетом этих положений, свойств максимальной скорости колебательного движения, а также результатов приведенного доказательства следуют требования к параметрам назначенного эталонного движения (7) [19]:

$$\omega_M < \omega_0, \quad \xi_M = 0,8, \quad \omega_M \leq 2,3 v_{\max} / |x_{T \text{ зад}} - x_{T_0}|, \quad (11)$$

$$T_M = 1,6 / \omega_M,$$

где v_{\max} – модуль максимальной скорости тележки крана, реализуемой приводом; x_{T_0} – начальное положение груза.

Закон управления (8) построен на точных значениях параметров рассматриваемого объекта управления (4) a_r^0, a_r . Но на практике при многообразии типов переносимых грузов, длин подвеса, внешних возмущениях в текущий момент времени они, как правило, неизвестны. Если бы можно было точно измерять переменную \ddot{x}_r , то на основании уравнения (4) можно было бы в законе управления (8) вместо скобки $(a_r^0 \varphi + a_r)$ использовать эту переменную. Но, как правило, на практике измерение переменной \ddot{x}_r сильно зашумлено, что снижает качество управления. Использование обычного низкочастотного фильтра вносит фазовую задержку, что также отрицательно сказывается на качестве управления.

Для решения указанных проблем предлагается использовать аппроксимацию величины \ddot{x}_r на основе текущей параметрической идентификации, дающей низкочастотную фильтрацию без сдвига по фазе. Это является частью подхода, названного «упрощенными» условиями адаптируемости [17].

Поэтому вместо формулы (8) предлагается строить закон управления на текущих оценках этих параметров:

$$\dot{x} \approx v_{\text{зад}} = -T_M^{-1} \left[(x_r - x_{r \text{ зад}}) + \omega_M^{-2} (\hat{a}_r^0 \varphi + \hat{a}_r) \right], \quad (12)$$

где верхним символом «крышка» обозначены текущие оценки соответствующих параметров, доставляемых алгоритмом текущей параметрической идентификации. В качестве последнего, например, можно использовать рекуррентный метод

наименьших квадратов с фактором забывания (процедура оценивания по методу наименьших квадратов обладает лучшими аппроксимационными свойствами, что общепризнано) [20]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i = \ddot{x}_{r_i} - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}, \\ P_i = \left[P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1} \right] / \beta, \quad (13) \\ P_0 = \vartheta E_2, \quad \beta < 1, \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases}$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ означает i -й момент времени с временным шагом Δt ; $\hat{\theta} = [\hat{a}_r^0, \hat{a}_r]^T$ – вектор оценок искоемых параметров; $y = [\varphi, 1]^T$ – вектор факторных переменных; ε – невязка идентификации; P_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2); β – назначаемый фактор забывания предыдущих измерений для слежения за изменяющимся во времени искомыми параметрами; ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; E_2 – единичная (2×2) матрица.

В приложении показано, что невязка идентификации алгоритма (13) при линейной независимости элементов вектор-функции y_i на скользящем временном интервале и на достаточно малом шаге Δt очень быстро сходится в область нуля (буквально с первых шагов работы алгоритма) и остается там, при этом сами оценки параметров могут быть далекими от истинных значений [17]. В статье [21] это также было показано при более жестких условиях работы замкнутой системы управления.

Таким образом, алгоритм (13) обеспечит выполнение условия

$$\ddot{x}_r \cong \hat{\ddot{x}}_r = \hat{a}_r^0 \varphi + \hat{a}_r, \quad (14)$$

т. е. аппроксимацию переменной \ddot{x}_r даже при неточных значениях оценок параметров.

А это значит, что с самого начала работы алгоритма идентификации оценки можно подставлять в закон управления (12). Отсюда также следует справедливость приведенного доказательства по достижению цели управления для текущих оценок параметров и $\hat{\ddot{x}}_r$ (в приближительном плане).

В заключение теоретической части отметим, что все приведенные выше выводы получены при условии, что $l^2 \gg r_r^2$ и справедливости уравнения (4). Модельные исследования показывают, что в случае нарушения этого условия, например, $l = r_r$, система управления с законом управления (12) и



алгоритмом идентификации (13) обеспечивает также высокое качество управления. Это объясняется, в частности, хорошими аппроксимационными свойствами алгоритма идентификации (13) с соблюдением условия (14) даже при умеренной некорректности сокращенной модели (4).

3. МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Модельный пример по анализу свойств замкнутой системы управления строился на основании зависимостей (1), (12), (13) с использованием формул (5), (7), (11). Моделирование проводилось в компьютерной среде Matlab/Simulink/SimMechanics. Дифференциальные уравнения решались методом Рунге – Кутты четвертого и пятого порядков с шагом 0,01 с.

Рассматривалось управление тележкой типового среднего крана со следующими значениями параметров: $m_T = 450$ кг, $m_m = 100 \div 10\,000$ кг, $l = 3 \div 10$ м, $r_T = 0,2 \div 5$ м, $k_{TP} = 0,3$ Н·с/м, $x_{T\text{зад}} = 10$ м. Привод, точнее, сервопривод, формирующий скорость перемещения тележки крана (\dot{x}) по заданной скорости ($v_{\text{зад}}$), моделировался аperiodическим звеном с единичным коэффициентом усиления и с постоянной времени 0,1 с, а также имел дополнительные нелинейности: временную задержку 0,03 с и ограничения по выходному сигналу: $v_{\text{max}} = 0,67$ м/с, $|\dot{v}| \leq 3$ м/с². Многие из указанных значений параметров соответствуют изложенному в стандарте [22] и многообразию типовых переносимых грузов.

Предполагалось, что на переносимый груз в момент времени 50 с действует ступенчатое ветровое возмущение интенсивностью 10 % от веса груза («ступенька» сглажена аperiodическим звеном с постоянной времени 1 с).

Считалось, что угловая скорость ϕ и ускорение \ddot{x}_T измеряются с помощью микромеханического датчика типа MPU-6050, расположенного рядом с грузом с передачей данных по беспроводному каналу. Эти данные зашумлены центрированными гауссовскими шумами со среднеквадратическими ошибками по угловой скорости 0,1 град/с, а по ускорению 0,1 м/с² [23]. Сигнал ϕ формировался путем интегрирования измеренной угловой скорости. Линейное перемещение тележки (x) определялось энкодером с аналогичным шумом со среднеквадратической ошибкой 0,01 м. По измеренным сигналам x , ϕ и по оценке длины подвеса (\hat{l}) определялось положение груза: $x_T = x + \hat{l}\phi$.

В описываемых здесь исследованиях принято $\hat{l} = l$, поскольку, согласно представленным выше зависимо-

стям, при ошибке такой оценки рассмотренный алгоритм управления краном породит постоянную неточность позиционирования груза, которая будет возникать только при наличии внешнего возмущения. При организации автоматизированной системы управления краном оператор всегда легко это компенсирует. Ошибка в определении параметра ω_0 на основе \hat{l} для задания ω_M остается малой даже при больших погрешностях \hat{l} в силу выражения (5). Так, ошибка в оценке \hat{l} до 30 % дает ошибку в определении ω_0 до 16 %.

Для алгоритма идентификации (13) приняты следующие параметры: $\Delta t = 0,01$ с, с таким же временным шагом реализуется закон управления (12); значения параметров $\vartheta = 10$, $\beta = 0,998$. В представленных вариантах работы крана собственная его частота изменяется в диапазоне $\omega_0 = 0,9 \div 1,8$ с⁻¹. Значения параметров закона управления (12) в силу выражения (11) приняты такими: $\omega_M = 0,15$ с⁻¹, $\xi_M = 0,8$, $T_M = 10,7$ с.

Поведение замкнутой системы управления по переменным x и x_T сравнивалось с переменной x_M , которая является выходом динамического звена, соответствующего эталонному движению (7): $\ddot{x}_M = -2\omega_M \xi_M \dot{x}_M - \omega_M^2 (x_M - x_{T\text{зад}})$ с указанными выше параметрами.

На рис. 2 представлены результаты исследования при средних значениях параметров работы крана: $m_T = 3\,000$ кг, $l = 5$ м, $r_T = 2$ м. Другие значения этих параметров из указанного выше их диапазона дают практически такие же кривые (расхождение – единицы процентов). Исключением являются только более высокочастотные переходные процессы около моментов времени $t = 0$ и $t = 50$ с по переменным v , ϕ , \hat{x}_T при большом отношении r_T/l , но в любом случае их продолжительность не превышает 5 с. Стабильность реакции замкнутой системы управления при большом многообразии параметров крана, груза и при действии внешнего возмущения говорит о более качественных характеристиках системы управления в условиях текущей неопределенности в сравнении с подходом, предложенным в работах [15, 16] и использующим модель объекта (3) с тремя неизвестными параметрами. В указанных работах, например, по вариантам грузов имела небольшая (но более существенная, чем указано выше) вариация времени переходного процесса и его характера.

Кроме того, на рис. 2 приведены графики изменения значений переменной \dot{x}_T и ее оценки $\hat{\dot{x}}_T$ по формуле (14), основанной на текущих оценках параметров по алгоритму (13). Как видим, алгоритм идентификации

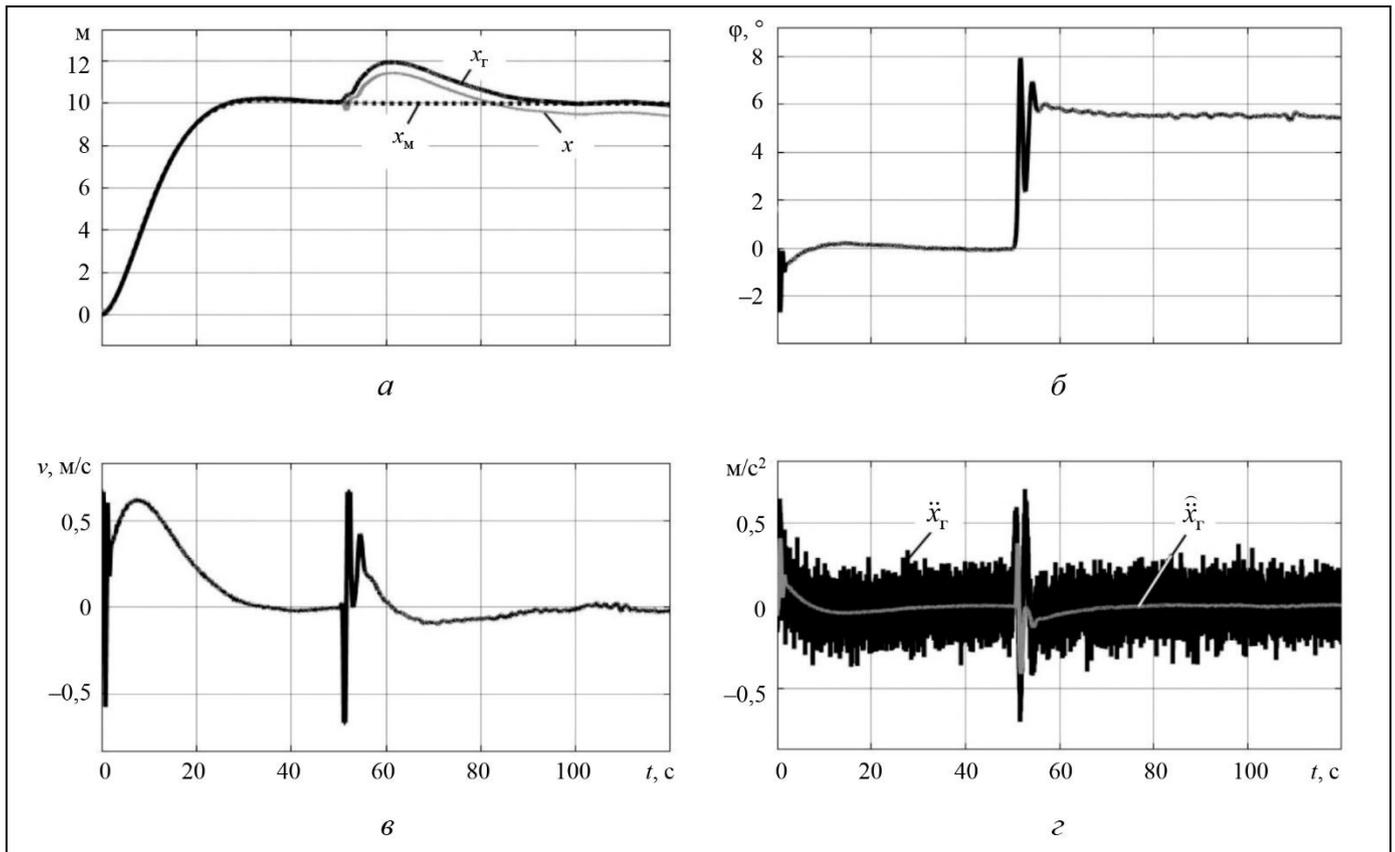


Рис. 2. Результаты исследования системы управления краном: *a* – линейные перемещения тележки и груза в сравнении с переменной x_m , *б* – изменение угла отклонения подвеса груза, *в* – скорость тележки, формируемая сервоприводом, *з* – вторая производная линейного перемещения груза, измеренная датчиком, и ее оценка

обеспечивает превосходные качества низкочастотного сглаживания без фазового сдвига, причем даже при нарушении принятого выше условия $l^2 \gg r_r^2$, т. е. при «не совсем корректном» использовании сокращенной модели переносимого груза.

Отметим, что также было проведено исследование факта нарушения третьего условия из выражения (11). В этом случае на участках движения, связанных с переходным процессом, когда тележка крана не может обеспечить нужную скорость перемещения, координата груза просто отстает от «эталонной» кривой. При приближении к установившемуся состоянию тождественность с эталоном восстанавливается. На практике небольшие такие отставания на переходных процессах не являются критическими.

Можно утверждать, что приведенные выше теоретические выкладки полностью подтверждены модельными исследованиями. Они показывают, что при большом разнообразии параметров груза его перемещение близко к поведению назначенного эталонного движения с достижением целевой точки. При возникновении ступенчатого ветрового воздействия оно успешно парируется. Все это выполняется в условиях текущей неопределенности указанных параметров. Подобные свойства без изменения алгоритма управления были получены и при других параметрах крана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача автоматизации управления тележкой мостового крана для переноса груза в заданную точку и гашения его угловых колебаний в условиях текущей неопределенности параметров крана, переносимого груза и внешних возмущений. Основой служат линеаризованная модель динамики перемещения груза в зависимости от скорости тележки, содержащей два неизвестных параметра, и идентификационный алгоритм на основе «упрощенных» условий адаптируемости.

Для реализации предложенного подхода нужно: выбрать параметры эталонного движения (7) с соблюдением условий (11), построить алгоритм текущей идентификации (13) и закон управления (12). Для выбора параметров эталонного движения необходима априорная информация о частоте собственных колебаний подвеса крана, определяемая по формуле (5) на основании данных о длине подвеса. Но эту частоту достаточно знать лишь очень приблизительно в силу условий (11). Также длина подвеса необходима для вычисления горизонталь-



ной координаты груза. Но неточность в определении длины подвеса сказывается лишь на постоянной ошибке позиционирования груза, к тому же только при наличии внешнего возмущения. Последнее может быть легко парировано оператором крана в автоматизированной системе управления. При создании полностью автоматической системы управления (например, при создании системы дистанционного управления краном), конечно, потребуется дополнительный датчик определения длины подвеса.

В качестве датчика информации о движении груза предлагается использовать современный микромеханический датчик, определяющий ускорение и угловую скорость, расположенный около груза с беспроводной передачей информации. Как вариант, возможно расположение такого, но уже проводного датчика на тележке крана.

В работе рассматривалась задача горизонтального перемещения по одной оси. Но представленные результаты, в силу свойства самоподстройки системы управления, могут быть обобщены на управление по двум горизонтальным осям и даже по трем осям – с одновременным вертикальным движением груза.

Предложенный алгоритм управления мостовым краном предполагается также исследовать на экспериментальной установке.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Обоснование эталонного движения (7).

Использование эталонной модели вместо модели (7) в обычном понимании (выходная переменная скалярного эталона соответствует регулируемой переменной) при управлении по координате груза невозможно. Это вытекает из следующих доводов.

$$\ddot{x}_M \approx -2\omega_M \xi_M \dot{x}_M - \omega_M^2 (x_M - x_{Г\text{зад}}),$$

где x_M соответствует переменной x_T ; тогда желаемая вторая производная линейного перемещения груза, которая выше обозначена как \ddot{x}_T^M , будет

$$\ddot{x}_T^M \approx -2\omega_M \xi_M \dot{x}_T - \omega_M^2 (x_T - x_{Г\text{зад}}),$$

а закон управления (8) будет иметь вид:

$$\dot{x} \approx v_{\text{зад}} = -T_M^{-1} \left[(x_T - x_{Г\text{зад}}) + \omega_M^{-2} (a_T^0 \varphi + a_T) \right] - l \dot{\varphi}.$$

Из-за последнего слагаемого в законе управления $\text{sign}(\dot{x}) = -\text{sign}(\dot{\varphi})$ получаем внутреннюю неустойчивость (см. рис. 1) формирования заданной скорости –

аналог неминимально-фазовой (неустойчивой по входу) системы. ♦

Доказательство сходимости невязки идентификации в алгоритме (13).

Исключим из рассмотрения тривиальные случаи, когда $y_i = 0$. А также примем, что норма вектора оценок ограничена. Умножив первое равенство (13) на ненулевой вектор y_i^T слева, прибавив к левой и правой части полученного слагаемое $(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)$, разлагая последнее на составные слагаемые в левой части уравнения и упрощая зависимость, найдем:

$$(\ddot{x}_{T_{i+1}} - \ddot{x}_{T_i}) - (y_{i+1} - y_i)^T \hat{\theta}_i = \varepsilon_{i+1} - (1 - \eta_i) \varepsilon_i,$$

где $\eta_i = y_i^T P_i y_i$, $0 < \eta_i < 1$.

Поскольку $P_i^{-1} = \sum_{k=1}^i (\vartheta^{-1} + y_i y_i^T) \beta^{i-k}$, указанное ограничение величины η_i легко доказывается непосредственным ее вычислением, когда y – скаляр. Это также доказывается и для многомерного случая путем рассмотрения диапазона собственных чисел матрицы P_i на основании отношения Рэлея. При этом для невырожденности матрицы P_i^{-1} требуется линейная независимость элементов вектор-функции y_i на скользком временном интервале «памяти» алгоритма.

В правой части представленного равенства описано «собственное движение» невязки идентификации, а слева – его «возмущение». «Собственное движение» этой дискретной системы является устойчивым в силу диапазона значений величины η_i . Норма «возмущения» тем меньше, чем меньше шаг Δt . Действительно, при уменьшении Δt нормы векторов в круглых скобках левой части равенства даже в условиях замкнутой системы управления становятся меньше: в принятых условиях по формуле (4) формируемая законом управления скорость тележки фактически не влияет на переменную \ddot{x}_T , а угол φ в составе вектора y связан с формируемой скоростью через интеграл, т.е. очень слабо. Последнее следует из третьего равенства в системе (2). Линейная независимость элементов φ_i и 1 вектор-функции y_i на скользком временном интервале, по крайней мере на переходных процессах, соблюдается.

Отсюда следует, что с уменьшением шага Δt устойчивое «собственное движение» невязки идентификации порождает все более узкую область ее притяжения около нуля [19]. ♦

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

- [Mescheryakov, V.N., Kolmykov, V.V. Methods for Determining Parameters of Cargo Transported by Bridge Cranes with Automatic Swinging Suppression System // *Fundamental Research*. – 2015. – No. 7. – P. 79–84. (In Russian)]
2. Рогова Н.С., Юркевич В.Д. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2017. – № 2(88). – С. 7–18. [Rogova, N.S., Yurkevich, V.D. Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshcheniya gruzha portal'nykh kranom // *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. – 2017. – No. 2(88). – S. 7–18. (In Russian)]
 3. Корытов М.С., Щербakov В.С., Шершнева Е.О. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // *Вестник СибАДИ*. – 2017. – № 1(53). – С. 12–19. [Korytov, M.S., Sherbakov, V.S., Shersheva, E.O. Justification of Values Factor Controller Vibration Damping Shipping Bridge Cranes // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. – 2017. – No. 1(53). – P. 12–19. (In Russian)]
 4. Антупов А.С., Краснова С.А. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 609–614. [Antipov, A. S., Krasnova, S. A. Stabilization System of Convey-crane Position Via Sigmoidal Function // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2019. – Vol. 20, no. 10. – P. 609–614. (In Russian)]
 5. Chen, Z.M., Meng, W.J., Zhang, J.G. Intelligent Anti-swing Control for Bridge Crane // *Journal of Central South University*. – 2012. Vol. 19, no. 10. – P. 2774–2781.
 6. Qian, D., Yi, J. Hierarchical Sliding Mode Control for Underactuated Cranes. Design, Analysis and Simulation. – Springer, 2015. – 199 p.
 7. Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X. Disturbance-Compensation-Based Continuous Sliding Mode Control for Overhead Cranes with Disturbances // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2020. – 17(4). – P. 2182–2189.
 8. Qian, Y., Hu, D., Chen, Y., Fang, Y. Programming-Based Optimal Learning Sliding Mode Control for Cooperative Dual Ship-Mounted Cranes Against Unmatched External Disturbances // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2023. – 20(2). – P. 969–980.
 9. Кабанов С.А., Никулин Е.Н., Якушев Б.Э., Якушева Д.Б. Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2011. – Т. 54, № 5. – С. 56–65. [Kabanov, S.A., Nikulin, E.N., Yakushev, B.E., Yakusheva, D.B. Optimal Control over Load Movement with Bridge Crane // *Journal of Instrument Engineering*. – 2011. – Vol. 54, no. 5. – P. 56–65. (In Russian)]
 10. Romasevych, Y.O., Loveikin, V.S., Khoroshun, A.S., et al. Synthesis of Optimal Feedback Control of the Crane–Load System // *International Applied Mechanics*. – 2022. – Vol. 58. – P. 199–207.
 11. Петренко Ю.Н., Алави С.Э., Александровский С.В. Исследование работы мостового крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2011. – № 3. – С. 20–25. [Petrenko, Yu.N., Alavi, S.Eh., Aleksandrovskii, S.V. Issledovanie raboty mostovogo kрана s kontrollerom nechetkoi logiki na osnove trekhmernoii imitatsionnoi modeli // *Ehnergetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i ehnergeticheskikh ob"edinenii SNG*. – 2011. – No. 3. – S. 20–25. (In Russian)]
 12. Drag, L. Model of an Artificial Neural Network for Optimization of Payload Positioning in Sea Waves // *Ocean Engineering*. – 2016. – Vol. 115. – P. 123–134.
 13. Sun, N., Fang, Y., Chen, H. Adaptive Antiswing Control for Cranes in the Presence of Rail Length Constraints and Uncertainties // *Nonlinear Dynamics*. – 2015. – Vol. 81. – P. 41–51.
 14. Zhang, M., Ma, X., Rong, X., et al. Adaptive Tracking Control for Double-Pendulum Overhead Cranes Subject to Tracking Error Limitation, Parametric Uncertainties and External Disturbances // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol. 76–77. – P. 15–32.
 15. 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. [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. – P. 682–688. (In Russian)]
 16. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки // *Доклады ТУСУР*. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 86–92. [Kruglov, S.P., Aksamentov, D.N. Adaptive Control of the Overhead Crane by the Trolley Speed // *Proceedings of TUSUR University*. – 2022. – Vol. 25, no. 1. – P. 86–92. (In Russian)]
 17. Круглов С.П. Адаптивная автоматизация пилотирования самолета на больших углах атаки на основе упрощенных условий адаптируемости. – Иркутск: ИФ МГТУ ГА, 2012. – 248 с. [Kruglov, S.P. Adaptivnaya avtomatizatsiya pilotirovaniya samoletom na bol'shikh uglakh ataki na osnove uproshchennykh uslovii adaptiruемости. – Irkutsk: IF MGTU GA, 2012. – 248 s. (In Russian)]
 18. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. I. Механика. 4-е изд. – М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с. [Sivukhin, D.V. Obshchii kurs fiziki. V 5 t. Tom I. Mekhanika. 4-e izd. – M.: Fizmatlit, Izd-vo MFTI, 2005. – 560 s. (In Russian)]
 19. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. Учеб. пособие для вузов. – СПб: Лань, 2015. – 624 с. [Pervozvanskii, A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya. Ucheb. posobie dlya vuzov. – SPb: Lan', 2015. – 624 s. (In Russian)]
 20. Лjung Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит. – 1991. – 432 с. [Ljung, L. System Identification: Theory for the User. – New Jersey: Prentice Hall Inc., 1991. – 519 p.]
 21. Круглов С.П. Адаптивное управление неминимально-фазовым скалярным объектом второго порядка с обеспечением заданных характеристик переходного процесса // *Научный вестник НГТУ*. – 2016. – № 4 (65). – С. 33–53. [Kruglov, S.P. Adaptive Control of a Non-minimal-phase Scalar Object of the Second Order with the Maintenance of the Preset Transient Characteristics // *Science Bulletin of the NSTU*. – 2016. – Vol. 64, no. 3. – P. 33–53 (In Russian)]
 22. ГОСТ 3332-54. Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т среднего и тяжелого режимов работы. Основные параметры и размеры. – М: Изд-во стандартов, 1974. [ГОСТ 3332-54. Kраны mostovye ehlektricheskie obshchego naznacheniya gruzopod'emnost'yu ot 5 do 50 t srednego i tyazhelogo rezhimov raboty. Osnovnye parametry i razmery. – M: Izd-vo standartov, 1974. (In Russian)]



23. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О. и др. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3 (25). – С. 9–22. [Zhmut, 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 // Automatics & Software Engineering. – 2018. – No. 3 (25). – P. 9–22 (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Поступила в редакцию 29.06.2023,
после доработки 13.07.2023.
Принята к публикации 18.07.2023.

Круглов Сергей Петрович – д-р техн. наук,
✉ kruglov_s_p@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9241-3352>

Ковыршин Сергей Владимирович – канд. техн. наук,
✉ sergkow@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5564-0951>

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск.

© 2023 г. Круглов С.П., Ковыршин С.В.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

IDENTIFICATION-BASED SPEED CONTROL OF AN OVERHEAD CRANE WITH A REDUCED CARGO TRANSFER MODEL

S.P. Kruglov and S.V. Kovyrshin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

✉ kruglov_s_p@mail.ru, ✉ sergkow@mail.ru

Abstract. This paper considers an automatic control approach for an overhead crane trolley under the current parametric uncertainty of the crane, transported cargo, and exogenous disturbances. It generates a given trolley speed, which corresponds to the modern hardware implementation of control of cranes with asynchronous motors and frequency converters. The approach is based on a control scheme with a current parametric identification algorithm, an implicit reference model, and “simplified” adaptability conditions to track cargo movements directly. This algorithm involves a recursive least-squares method with the forgetting factor. Unlike previous publications on the topic, the idea is to use a reduced model of the “crane–cargo” object when moving the cargo along one horizontal axis. In this case, it is necessary to estimate only two parameters; moreover, the construction of the control algorithm becomes simpler and the closed-loop control system has a better performance. The stability of the closed-loop control system is proved and requirements for the parameters of the assigned reference motion are found. Due to the self-tuning property of the control system, the approach can be obviously generalized to construct an overhead crane control system along two horizontal axes and three axes (with simultaneous vertical movement of the cargo). A model example is given to demonstrate the implementability of this crane control system based on modern controllers and sensors.

Keywords: automatic control of overhead crane, adaptive control system, parametric identification algorithm, current parametric uncertainty, stability of the closed-loop control system.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-00654; <https://rscf.ru/project/23-29-00654/>.