

# СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ КРАНОМ С НОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СОВМЕЩЕННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ И УГЛОВОЙ СКОРОСТИ<sup>#</sup>

С. П. Круглов\*, С. В. Ковыршин\*\*, Д. В. Буторин\*\*\*

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

\*✉ [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru), \*\*✉ [sergkow@mail.ru](mailto:sergkow@mail.ru), \*\*\*✉ [den\\_butorin@mail.ru](mailto:den_butorin@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрен способ автоматизации управления мостовым краном при текущей неопределенности его параметров, параметров переносимого груза и внешних возмущений. Целью управления является перемещение груза в горизонтальной плоскости в точку, обеспечивающую итоговую доставку груза в назначенное место с одновременным парированием угловых колебаний подвеса и обеспечением заданных динамических характеристик. Для этого применен подход, основанный на схеме управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной модели и «упрощенных» условиях адаптируемости с нацеленностью на непосредственное отслеживание перемещения груза. Закон управления формирует заданную скорость тележки, обрабатываемую сервоприводом. При выборе параметров закона управления используются паспортные данные крановой установки. В отличие от ранее опубликованных работ по этой тематике предлагается решение, которое является более простым, надежным в эксплуатационном плане и менее дорогостоящим. Это достигается расположением совмещенного датчика, включающего акселерометр и датчик угловой скорости, на тросе подвеса около тележки крана, использованием алгоритмического решения, не требующего предварительного вычисления дрейфа датчика угловой скорости, и более эффективной процедуры текущей параметрической идентификации. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие указанное. Аналогичный пример был реализован и на экспериментальной установке.

**Ключевые слова:** мостовой кран, автоматизация управления, текущая параметрическая неопределенность, алгоритм параметрической идентификации, аппроксимация.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи автоматизации переноса подвешенного груза при работе кранов различного вида, включая мостовые, являются достаточно актуальными. Это связано с большой распространенностью таких кранов, а также необходимостью гашения маятниковых колебаний, снижающих безопасность, производительность, точность работ и пр. Особенно важно осуществить автоматизацию в условиях текущей неопределенности параметров крановой установки, груза и внешних возмущений, что свя-

зано с большим разнообразием режимов работы кранов.

Существует много разработанных методов автоматизации управления мостовыми кранами, решающих эту задачу в разных ее постановках:

- Подходы на основе использования ПИД-, ПИ- и ПД-регуляторов (см., например, работы [1–3]). Недостатком этих методов является необходимость предварительной настройки регуляторов для конкретного диапазона параметров крана и груза.

- Способы управления мостовым краном путем использования скользящих режимов (см., например, работы [4, 5]). Их основным недостатком является появление высокочастотных составляющих в управлении приводом, что отрицательно сказыва-

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

вается на эксплуатационных свойствах системы управления.

- Метод управления мостовым краном на основе нейросетевого контроллера [6, 7]. Его недостатком является большое время обучения нейросети.

- Способ адаптивного управления тележкой мостового крана, в котором используется функция Ляпунова с настройкой параметров регулятора на базе градиентного алгоритма идентификации [8, 9]. Основным недостатком данного метода является проблема выбора параметров дискретного алгоритма идентификации для конкретного случая с обеспечением устойчивости замкнутой системы управления.

В работах [10, 11] рассмотрен подход к управлению мостовым краном в условиях текущей параметрической неопределенности на основе схемы адаптивного управления с параметрическим идентификатором, неявной эталонной моделью и с использованием «упрощенных» условий адаптируемости. Предложено использовать асинхронный сервопривод, который является достаточно быстродействующим в полном диапазоне эксплуатационных нагрузок [12]. Разрабатываемый закон направлен на формирование заданной скорости приводов и нацелен на непосредственное отслеживание линейного перемещения груза. Настоящая статья является логическим продолжением указанных работ и направлена на упрощение построения системы управления и снижение эксплуатационных затрат путем модернизации указанного подхода.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать движение крана и груза только по одной оси горизонтального перемещения груза, соответствующей передвижению тележки крана (схема представлена на рис. 1; в отношении другой оси, соответствующей перемещению балки крана, рассуждения аналогичные).

На рис. 1 и в дальнейших рассуждениях используются следующие обозначения:

$m_T, m_G$  – масса тележки крана, с учетом инерционности вращающихся масс, и масса переносимого груза соответственно (в качестве груза подразумевается непосредственно переносимый груз и захватное устройство – крюк);

$r_G$  – радиус инерции груза;

$l$  – длина подвеса груза, или расстояние от точки крепления подвеса на тележке до центра масс груза; примем, что  $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$ ;  $l_{\min}, l_{\max}$  – минимальное и максимальные значения длины подвеса соответственно;

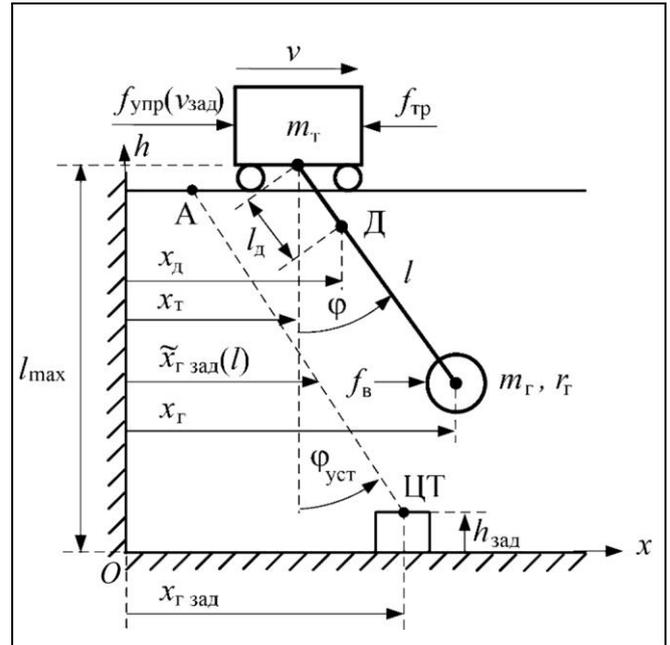


Рис. 1. Схема перемещения мостового крана с грузом по одной горизонтальной оси, соответствующей перемещению тележки крана

$x_T$  – перемещение тележки вдоль горизонтальной оси  $Ox$ ;

$v = \dot{x}_T$  – скорость перемещения тележки с ограничением  $|v| \leq v_{\max}$ , а  $v_{\text{зад}}$  – заданное значение этой скорости;

$f_{\text{упр}}$  – управляющая сила со стороны сервопривода, формируемая последним по сигналу  $v_{\text{зад}}$ ;

$f_{\text{тр}}$  – сила трения, противодействующая перемещению тележки;

$f_{\text{в}}$  – сила ветрового воздействия, приложенная в центре масс груза (ветровая нагрузка);

$\varphi$  – угол отклонения подвеса груза от вертикальной оси;

$x_G = x_T + l \sin \varphi$  – горизонтальное перемещение груза;

Д – точка расположения совмещенного датчика на канате подвеса (поясняется далее);

$l_d$  – длина подвеса до совмещенного датчика (расстояние от точки крепления подвеса на тележке до точки Д),  $0 < l_d < l_{\min}$ ;

$x_d = x_T + l_d \sin \varphi$  – горизонтальное перемещение совмещенного датчика;

ЦТ – целевая точка доставки груза с координатами  $(x_{G \text{ зад}}, h_{\text{зад}})$ ;

$x_{G \text{ зад}}$  – координата целевой точки по горизонтальной оси  $Ox$ ;



$h_{\text{зад}}$  – координата целевой точки по вертикальной оси  $Oh$  (высота погрузки);

$\varphi_{\text{уст}} = \arctg(f_{\text{в}}/(m_{\text{т}}g))$  – предполагаемое установившееся постоянное значение угла  $\varphi$  по окончании регулирования,  $g$  – ускорение свободного падения;

$\tilde{x}_{\text{т зад}}(l) = x_{\text{т зад}} - (l_{\text{макс}} - h_{\text{зад}} - l)\sin\varphi_{\text{уст}}$  – заданное положение груза по горизонтальной оси на текущей длине подвеса, или расстояние от нулевой точки до линии «А–ЦТ» по оси  $Ox$ .

Примем, что внешнее возмущение, образованное силой трения и ветровой нагрузкой, представляет собой ступенчатый сигнал с ограниченной амплитудой.

На основе математической модели механической системы (см. рис. 1), описанной в работе [13] без учета массы каната и трения углового движения, в силу их малости, а также начальных значений переменных, характеризующих положение и скорость, с применением теоремы Пуансо для учета воздействия ветра, динамику движения этой механической системы можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (m_{\text{т}} + m_{\text{г}})\ddot{x}_{\text{т}} + (m_{\text{т}}l\cos\varphi)\ddot{\varphi} = \\ = f_{\text{упр}} - f_{\text{тр}} + f_{\text{в}} + m_{\text{т}}l\dot{\varphi}^2\sin\varphi; \\ (m_{\text{т}}l\cos\varphi)\ddot{x}_{\text{т}} + m_{\text{т}}(l^2 + r_{\text{г}}^2)\ddot{\varphi} = \\ = -m_{\text{т}}gl\sin\varphi + lf_{\text{в}}\cos\varphi; \\ x_{\text{т}} = x_{\text{т}} + l\sin\varphi. \end{cases} \quad (1)$$

Обычно диапазон угла  $\varphi$  небольшой (не практике не более  $10-20^\circ$ ), скорость его изменения также невысокая, поэтому с учетом кинематики движения можно принять  $\sin\varphi \approx \varphi$ ,  $\cos\varphi \approx 1$ ,  $\dot{\varphi}^2\sin\varphi \approx 0$ . Тогда систему (1) можно представить в линеаризованном виде:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{\text{т}} \approx a_{\text{х}}^{f_{\text{упр}}} f_{\text{упр}} + a_{\text{х}}^{\varphi}\varphi + a_{\text{х}}; \\ \ddot{\varphi} \approx a_{\varphi}^{f_{\text{упр}}} f_{\text{упр}} + a_{\varphi}^{\varphi}\varphi + a_{\varphi}; \\ x_{\text{т}} \approx x_{\text{т}} + l\varphi; \dot{x}_{\text{т}} \approx \dot{x}_{\text{т}} + l\dot{\varphi}; \ddot{x}_{\text{т}} \approx \ddot{x}_{\text{т}} + l\ddot{\varphi}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a_{\text{х}}^{f_{\text{упр}}} = \gamma^{-1}m_{\text{т}}(l^2 + r_{\text{г}}^2)$ ;  $a_{\text{х}}^{\varphi} = \gamma^{-1}g(m_{\text{т}}l)^2$ ;  $a_{\text{х}} = \gamma^{-1}m_{\text{т}}[-(l^2 + r_{\text{г}}^2)f_{\text{тр}} + l^2f_{\text{в}}]$ ;  $a_{\varphi}^{f_{\text{упр}}} = -\gamma^{-1}m_{\text{т}}l$ ;  $a_{\varphi}^{\varphi} = -\gamma^{-1}(m_{\text{т}} + m_{\text{г}})m_{\text{т}}gl$ ;  $a_{\varphi} = \gamma^{-1}l[m_{\text{т}}f_{\text{тр}} + (m_{\text{т}} + m_{\text{г}})f_{\text{в}}]$ ;  $\gamma = m_{\text{т}}[m_{\text{т}}l^2 + (m_{\text{т}} + m_{\text{г}})r_{\text{г}}^2]$ .

Переписывая третье уравнение третьей строки системы (2) с использованием зависимостей, представленных в первых двух строках этой системы, выражая сигнал  $f_{\text{упр}}$  из первого равенства (2) и подставляя его в полученный результат, определим, что движение груза можно описать через скорость тележки следующим образом:

$$\ddot{x}_{\text{т}} \approx a_{\text{т}}^{\dot{v}}\dot{v} + a_{\text{т}}^{\varphi}\varphi + a_{\text{т}}, \quad (3)$$

где  $a_{\text{т}}^{\dot{v}} = r_{\text{г}}^2/(r_{\text{г}}^2 + l^2)$ ;  $a_{\text{т}}^{\varphi} = l(a_{\varphi}^{\varphi} - a_{\text{х}}^{\varphi}a_{\varphi}^{f_{\text{упр}}}/a_{\text{х}}^{f_{\text{упр}}}) = -g\mu$ ;  $\mu = l^2/(l^2 + r_{\text{г}}^2)$  – безразмерный коэффициент влияния радиуса инерции груза;  $a_{\text{т}} = l(a_{\varphi} - a_{\text{х}}a_{\varphi}^{f_{\text{упр}}}/a_{\text{х}}^{f_{\text{упр}}})$  – величина, равная ускорению груза, образованному внешними возмущениями; также предполагаем, что значения переменных  $x_{\text{т}}$  и  $\dot{x}_{\text{т}}$  в начальный момент времени известны.

Для дальнейших рассуждений вначале примем, что  $l^2 \gg r_{\text{г}}^2$  – это соответствует большинству случаев на практике. Тогда параметр  $a_{\text{т}}$  зависит только от ветра и  $a_{\text{т}}^{\dot{v}} \approx 0$ . Это позволяет переписать уравнение (3) в виде

$$\ddot{x}_{\text{т}} \approx a_{\text{т}}^{\varphi}\varphi + a_{\text{т}} \approx -g\varphi + a_{\text{т}}, \quad (4)$$

здесь параметр  $a_{\text{т}}$  представляет собой ускорение, сформированное только силой ветра.

Это равенство показывает, что при указанных допущениях на линейное перемещение груза в основном влияет только угловое положение подвеса и ветровая нагрузка. Далее уравнение (4) будем использовать в качестве объекта управления. Хотя оно существенно упрощено и справедливо только в указанных допущениях, в дальнейшем оно будет использовано для формирования закона управления в виде аппроксимации линейного перемещения груза, аналогично изложенному в работе [11], только с некоторой модификацией.

В статье [11] на основании параметров, приведенных на рис. 1, и равенства (4) определена собственная частота угловых колебаний груза  $\omega_0$ , которая удовлетворяет соотношениям

$$\omega_0 \approx \sqrt{-a_{\text{т}}^{\varphi}/l} = \sqrt{\mu g/l} \approx \sqrt{g/l}; \quad \omega_0 \geq \sqrt{g/l_{\text{макс}}}. \quad (5)$$

Ставится задача: в условиях текущей неопределенности параметров крана, груза и указанных возмущений, у которых момент времени начала их действия и интенсивность неизвестны (исключение составляют паспортные данные крана  $l_{\text{мин}}$ ,  $l_{\text{макс}}$ ,  $v_{\text{макс}}$ , координаты целевой точки груза

$x_{Г\text{зад}}, h_{\text{зад}}$  и начальное положение тележки и груза по горизонтальной оси – они считаются известными), сформировать закон управления горизонтальным перемещением груза в виде заданной скорости тележки крана, обработка которой сервоприводом тележки обеспечит достижения условий

$$\phi \rightarrow 0; \quad x_{Г} \rightarrow \tilde{x}_{Г\text{зад}}(l). \quad (6)$$

Заметим, что второе условие (6), если  $\phi_{\text{уст}} \neq 0$ , требует позиционирования груза не над целевой точкой доставки груза, а так, чтобы по окончании регулирования без дополнительных перемещений тележки при опускании груза обеспечить его доставку в целевую точку (движение груза по линии «А – ЦТ»). Кроме того, требуется достижения условий (6) с динамикой движений, близкой к требуемой, определяемой с учетом скоростных характеристик сервопривода. В силу достаточно высокого быстродействия современных асинхронных сервоприводов (задержка в обработке сигнала на уровне сотых и десятых долей секунды) будем считать, что  $\dot{x}_{Г} \cong v_{\text{зад}}$  [12].

В качестве источника информации, доставляющего основные данные о подвесе и грузе, будем использовать совмещенный датчик в виде акселерометра и датчика угловой скорости, расположенного на канате подвеса (аналогично тому, как предложено авторами патента [3]) в месте, близком к тележке крана (соответствует точке Д на рис. 1, более детальная схема представлена на рис. 2).

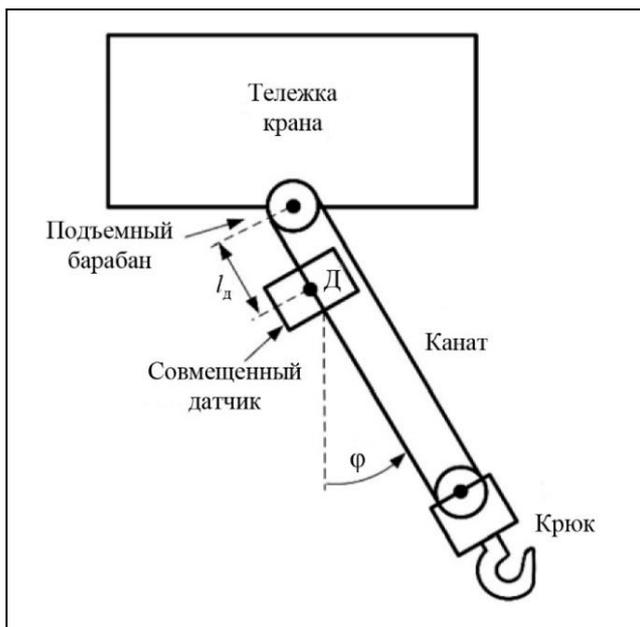


Рис. 2. Схема размещения совмещенного датчика на канате подвеса

Такое положение совмещенного датчика на канате выгодно отличается от предложенного в работе [11] расположения его на крюке с дистанционной формой передачи информации:

- есть возможность организовать проводную передачу информации от датчика и электропитания для датчика, это намного надежнее и проще и позволяет снизить эксплуатационные затраты;
- датчик находится в безопасном месте, не подвергается внешним механическим воздействиям;
- легко организовать фиксацию осей чувствительности датчика (крюк подвеса часто вращается вокруг вертикальной оси);
- данные, получаемые с такого датчика, универсальны независимо от кинематической схемы подъемного механизма [14];
- на датчик в меньшей степени передаются неосновные высокочастотные дополнительные (в том числе недо моделированные) движения груза, связанные с двухмаятниковыми движениями, формируемыми крюком и грузом.

## 2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Для достижения условий (6) с формированием заданной скорости тележки крана применяется, как и в работе [11], подход, основанный на схеме управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной модели и «упрощенных» условиях адаптируемости с нацеленностью на непосредственное отслеживание перемещения груза. Этому подходу соответствует назначаемая неявная эталонная модель в форме колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени  $t_0$ , равными соответствующим для исходного объекта:

$$\ddot{x}_M = -2\omega_M \xi_M \dot{x}_M - \omega_M^2 (x_M - \tilde{x}_{Г\text{зад}}(l)), \quad (7)$$

$$x_M(t_0) = x_{Г}(t_0), \quad \dot{x}_M(t_0) = \dot{x}_{Г}(t_0),$$

где  $x_M$  – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза, соответствует переменной  $x_{Г}$ ;  $\omega_M, \xi_M$  – эталонные значения собственной частоты и относительного коэффициента затухания соответственно – выбираемые параметры эталонной модели [15].

Вначале будем считать, что значения параметров  $a_{Г}^{\phi}, a_{Г}$ , а также переменных  $\phi$  и  $\phi_{\text{уст}}$  известны. Приравнявая правые части уравнения (4) и первого равенства (7), заменяя  $x_M$  на  $x_{Г}$ , а  $\dot{x}_M$  на  $\dot{x}_{Г}$ , найдем закон формирования заданной скорости тележки крана  $v_{\text{зад}}$ :



$$\begin{aligned}\dot{x}_T &\approx v_{\text{зад}} = T_x^{-1} \left[ \left( \tilde{x}_{T \text{ зад}}(l) - x_T \right) - \omega_M^{-2} \left( a_T^\varphi \varphi + a_T \right) \right] = \\ &= T_x^{-1} \left( \tilde{x}_{T \text{ зад}}(l) - x_T \right) - 0,25 T_x \xi_M^{-2} \left( a_T^\varphi \varphi + a_T \right),\end{aligned}\quad (8)$$

где  $T_x = 2\xi_M/\omega_M$  – задаваемая по эталону постоянная времени линейного перемещения тележки и груза, или постоянная времени регулирования.

Действительно, если в формулу (8) вместо члена  $a_T^\varphi \varphi + a_T$  на основании уравнения (4) подставить  $\ddot{x}_T$ , то с учетом обозначений, введенных в выражении (7), получим равенство, описывающее поведение груза в замкнутой системе управления с законом (8):

$$\ddot{x}_T \approx -2\omega_M \xi_M \dot{x}_T - \omega_M^2 \left( x_T - \tilde{x}_{T \text{ зад}}(l) \right). \quad (9)$$

Оно соответствует назначенному эталону (7), за исключением того, что вместо  $\dot{x}_T$  подставлена переменная  $\dot{x}_T$  – это сделано специально для устранения внутренней неустойчивости в замкнутой системе управления.

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

$$\tilde{x}_{T \text{ зад}}(l) - x_T = x_{T \text{ зад}} - x_T, \quad (10)$$

где  $x_{T \text{ зад}} = \tilde{x}_{T \text{ зад}}(0) = x_{T \text{ зад}} - (l_{\text{max}} - h_{\text{зад}})\varphi_{\text{уст}}$ .

В связи с этим равенство (8) запишем в виде уравнения динамики замкнутой системы управления:

$$T_x \dot{x}_T + x_T \approx x_{T \text{ зад}} - \omega_M^{-2} \left( a_T^\varphi \varphi + a_T \right). \quad (11)$$

При отсутствии углового движения ( $\varphi \equiv 0$ ) и возмущений ( $a_T \equiv 0$ ) отсюда следует, что  $x_T \rightarrow x_{T \text{ зад}}$  и, соответственно,  $\dot{x}_T \rightarrow \tilde{x}_{T \text{ зад}}(l)$  по апериодическому закону с постоянной времени  $T_x$  (отсюда название этого параметра).

Из формул (4) и (11) также следует, что если в замкнутой системе управления достигается установившееся состояние  $\dot{x}_T \rightarrow 0$ ,  $\dot{\varphi} \rightarrow 0$ ,  $\dot{x}_T \rightarrow 0$ ,  $\ddot{x}_T \rightarrow 0$ , то это может быть только в случае, когда  $\varphi \rightarrow \varphi_{\text{уст}} = -a_T/a_T^\varphi$  и  $x_T \rightarrow x_{T \text{ зад}}$ , а значит, согласно выражению (10),  $x_T \rightarrow \tilde{x}_{T \text{ зад}}(l)$ .

В работе [11] доказано, что при  $\omega_M < \omega_0$  для замкнутой системы управления (2), (4), (8) при  $t \rightarrow +\infty$  справедливо  $\dot{x}_T \rightarrow 0$ ,  $\dot{\varphi} \rightarrow 0$ ,  $\dot{x}_T \rightarrow 0$ ,  $\ddot{x}_T \rightarrow 0$ , а значит, достигается заданная цель управления (6).

При ведении крановых работ очевидным желаемым движением груза к заданной точке является процесс с минимально возможным временем регулирования и с минимальным перерегулированием. Известно, что для колебательного звена этому требованию соответствуют значения относительного коэффициента затухания не менее 0,71 [15]. Также следует учесть, что выбор значений параметров  $\omega_M$ ,  $T_x$  в формуле (8) необходимо увязывать с максимальной скоростью привода и требуемым перемещением груза. С учетом этих положений, закона (8) и равенства (11) без последнего слагаемого (рассматривается только апериодический процесс и максимальная его скорость [15]) можно записать требования к этим параметрам в следующем виде:

$$\begin{aligned}0,71 \leq \xi_M < 1; \quad \omega_M = \frac{2\xi_M v_{\text{max}}}{k_{\text{пп}} \Delta x_T} < \omega_0; \\ T_x \triangleq T_x(\Delta x_T) = k_{\text{пп}} \frac{\Delta x_T}{v_{\text{max}}} > \frac{2\xi_M}{\omega_0} = \frac{\xi_M T_0}{\pi} \stackrel{\xi_M=0,8}{\approx} \frac{T_0}{4},\end{aligned}\quad (12)$$

где  $k_{\text{пп}}$  – положительный коэффициент изменения времени переходного процесса, выбираемый с учетом соблюдения неравенств (12);  $\Delta x_T = |x_{T \text{ зад}} - x_{T_0}|$  – расстояние переноса груза;  $x_{T_0}$  – начальное положение груза по оси  $Ox$ ;  $T_x(\Delta x_T)$  – зависимость параметра  $T_x$  от  $\Delta x_T$ , при фиксированной величине указанного аргумента далее также будет использоваться обозначение  $T_x$ ;  $T_0$  – период собственных маятниковых колебаний подвеса груза.

Поясним выбор значения коэффициента  $k_{\text{пп}}$ . Если  $k_{\text{пп}} \geq 1$ , в переходном процессе соблюдается  $|v| \leq v_{\text{max}}$ ; чем больше значение коэффициента, тем больше время регулирования. При  $k_{\text{пп}} < 1$  время переходного процесса будет уменьшаться, но при этом скорость тележки может достигать значения  $v_{\text{max}}$ , соответственно в эти моменты времени управления по гашению колебаний нет, что, конечно же, снижает качество управления.

В силу соотношений (5) третье неравенство (12) будет гарантированно выполняться, если

$$\begin{aligned}T_x(\Delta x_T) = k_{\text{пп}} \frac{\Delta x_T}{v_{\text{max}}} > \\ > \frac{2\xi_M}{\sqrt{g}} \sqrt{l_{\text{max}}} \stackrel{\xi_M=0,8}{\approx} \sqrt{l_{\text{max}}}/2,\end{aligned}\quad (13)$$

где единицы измерения соответствуют системе СИ.

На рис. 3 представлена область допустимых значений параметра  $T_x$  в соответствии с его зависимостью от  $l_{\max}$  по формуле (13) при  $\xi_m = 1$  (верхняя незаштрихованная область фигуры). Обозначенная граница представляет минимальное значение  $T_x$ .

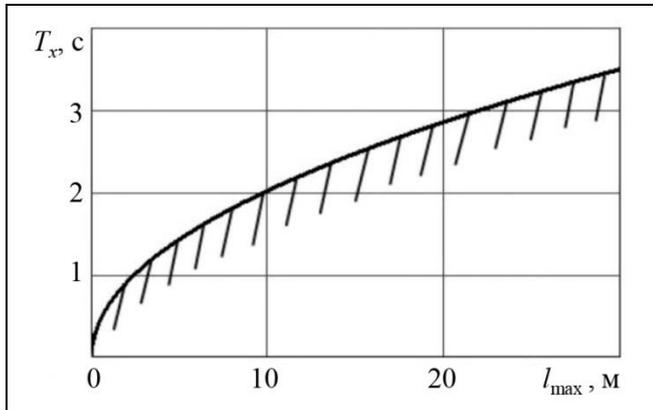


Рис. 3. Область допустимых значений параметра  $T_x$  закона формирования заданной скорости в зависимости от максимальной длины подвеса крана при единичном значении относительного коэффициента затухания эталонной модели (верхняя незаштрихованная область)

Отсюда следует, что на основе выражения (13) можно определить значение параметра  $T_x$  для закона (8) по паспортным данным крановой установки  $l_{\max}$ ,  $v_{\max}$  и расстоянию переноса груза  $\Delta x_T$ , которые заранее известны. Также можно уточнить этот параметр по информации о периоде свободных колебаний подвеса в соответствии с неравенством (12).

Соотношения (12), (13) отражают граничные для устойчивости значения параметра  $T_x$  в законе (8). Очевидно, что чем дальше лежит значение этого параметра от указанных ограничений (т. е. чем больше значение  $T_x$ ), тем устойчивее замкнутая система управления. Однако при этом переходный процесс становится более длительным.

Рассмотрим пример выбора значения параметра  $T_x$  по указанным соотношениям. Пусть  $l_{\max} = 10$  м,  $v_{\max} = 1$  м/с,  $\Delta x_T = 8$  м,  $\xi_m = 0,8$ ,  $k_{\text{шт}} = 1$ . Тогда по формуле (13)  $T_x > 1,6$  с и  $T_x = 8$  с. Такое решение на основании уравнения (11) (будем считать, что к концу переходного процесса маятниковые колебания будут демпфированы) обеспечивает время регулирования по переносу груза в заданную точку  $t_{\text{рег}} \approx 3T_x = 24$  с [15]. При уменьшении расстояния переноса груза получаем снижение значений этих параметров:  $T_x \geq 1,6$  с,  $t_{\text{рег}} \geq 4,8$  с. Эти показатели соответствуют требованиям норм времени [16],

например, для средних кранов с грузоподъемностью до 50 т, которые рассматриваются далее в модельном примере.

Закон формирования заданной скорости (8) построен на точном значении выражения  $a_T^{\phi} \phi + a_T$ , а значит, параметров рассматриваемого объекта управления (4)  $a_T^{\phi}$ ,  $a_T$ . При многообразии типов переносимых грузов, длин подвеса, внешних возмущениях на практике в текущий момент времени значения рассматриваемых параметров, как правило, неизвестны. Проблемой также является и точное определение угла  $\phi$ . В законе (8) вместо скобки  $(a_T^{\phi} \phi + a_T)$  можно использовать переменную  $\ddot{x}_T$ . Однако прямое измерение этого ускорения с помощью акселерометра, установленного в центре тяжести груза, невозможно в силу того, что акселерометр измеряет сумму ускорений – кажущегося ускорения (которое является порождением реакции опоры из-за силы тяжести) и непосредственно искомого ускорения. Использование зависимости  $\ddot{x}_T \approx \ddot{x}_T + l\ddot{\phi}$  из системы (2) требует знания длины подвеса  $l$ , а также дает сильно зашумленный сигнал из-за использования ускорений.

Для того, чтобы упростить систему управления краном, предлагается вместо линейного ускорения груза в законе (8) использовать линейное ускорение совмещенного датчика  $\ddot{x}_d$ , расположенного на расстоянии  $l_d$  от тележки ( $0 < l_d < l_{\min}$ ) в точке Д (см. рис. 1 и 2). Причем будем использовать не сам сигнал этого ускорения, а его аппроксимацию на основе текущей параметрической идентификации, как в работе [11].

Линейное ускорение груза с учетом принятых допущений в силу формул (2) и (4) имеет вид  $\ddot{x}_T \approx \ddot{x}_T + l\ddot{\phi} \approx a_T^{\phi} \phi + a_T \approx -g\phi + a_T$ . Очевидно, что такое же ускорение для совмещенного датчика равно  $\ddot{x}_d \approx \ddot{x}_T + l_d \ddot{\phi}$ . Сравнивая эти зависимости, несложно найти

$$\begin{aligned} \ddot{x}_d &\approx \ddot{x}_T + l_d \ddot{\phi} \approx \ddot{x}_T - (l - l_d) \ddot{\phi} \approx \\ &\approx -g\phi + a_T - (l - l_d) \ddot{\phi}. \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом этого равенства и формулы (10) закон (8) запишем с заменой переменной  $x_T$  на  $x_d$ :

$$\begin{aligned} \dot{x}_T \approx v_{\text{зад}} &= T_x^{-1} \left[ (x_{d \text{ зад}} - x_d) - \omega_m^{-2} \ddot{x}_d \right] \approx \\ &\approx T_x^{-1} \left( x_{d \text{ зад}} - (l_{\max} - h_{\text{зад}}) \phi_{\text{уст}} - x_T \right) - \\ &- 0,25 T_x \xi_m^{-2} \left( -g\phi + a_T - (l - l_d) \ddot{\phi} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $x_{d \text{ зад}} = \tilde{x}_T(x_{d \text{ зад}}) = x_{T \text{ зад}} - (l_{\max} - h_{\text{зад}} - l_d) \phi_{\text{уст}}$ .



Из первой части выражения (15) непосредственно следует уравнение, описывающее горизонтальное перемещение совмещенного датчика, аналогичное равенству (9), где вместо переменной  $x_T$  необходимо подставить  $x_D$ . Если в упомянутом выше доказательстве из работы [11] по условиям достижения поставленной цели управления сделать такую же замену, получим те же самые выводы, только для линейного перемещения совмещенного датчика. А поскольку последний находится между точкой крепления подвеса к тележке и центром тяжести груза на одной линии с ними, а также на основе формулы (10), отсюда следует, что закон (15) аналогичен выражению (8).

Для реализации закона формирования заданной скорости (15), в частности, нужно определять текущие значения переменной  $\varphi_{уст}$  и аппроксимированное значение  $\ddot{x}_D$ . Рассмотрим способы их определения.

Значение  $\varphi_{уст} \neq 0$  может быть только в результате действия ветра. Если в точке Д подвеса находится акселерометр, измеряющий сумму ускорения реакции опоры от силы тяжести и  $\ddot{x}_D$ , его значение определится с учетом формулы (14) как  $\ddot{x}_D^{акс} \approx g\varphi + \ddot{x}_D$ . Как указано выше, на установившемся процессе в замкнутой системе управления  $\ddot{x}_D \equiv 0$ . Поэтому отсюда можно определить искомый параметр:

$$\widehat{\varphi}_{уст} \approx \left( \ddot{x}_D^{акс} / g \right)_{нч}, \quad (16)$$

где верхний символ « $\widehat{\phantom{x}}$ » означает оценку;  $\ddot{x}_D^{акс}$  – показания акселерометра, установленного в точке Д подвеса с осью чувствительности, ортогональной канату подвеса; нижний индекс «нч» обозначает низкочастотную фильтрацию для устранения составляющих переходного процесса.

Для аппроксимации  $\ddot{x}_D$  будем использовать интеграл от сигнала с датчика угловой скорости, расположенного также в точке Д подвеса. В силу известного дрейфа этого датчика такая процедура породит зависимость

$$\int_t \omega_{ДУС} dt \approx \varphi + \Delta\omega_{др}t + \varphi_0, \quad (17)$$

где  $\omega_{ДУС}$  – данные, полученные с датчика угловой скорости с осью чувствительности, параллельной оси вращения подвеса;  $\Delta\omega_{др} \approx \text{const}$  – дрейф этого датчика;  $\varphi_0$  – начальное значение угла  $\varphi$ .

Аппроксимирующий алгоритм текущей параметрической идентификации предлагается строить на основе уравнений (14) и (17), порождающих равенство

$$z \triangleq \ddot{x}_D + g \int_t \omega_{ДУС} dt = \ddot{x}_T + l_D \ddot{\varphi} + g \int_t \omega_{ДУС} dt \approx \approx \widehat{a}_1 t + \widehat{a}_2 = \widehat{\theta}^T \mathbf{y}, \quad (18)$$

где  $z$  – отклик объекта идентификации;  $\widehat{a}_1$ ,  $\widehat{a}_2$  – оценки параметров  $a_1 = g\Delta\omega_{др}$ ,  $a_2 = g\varphi_0 + a_T$ ;  $\widehat{\theta}^T = [\widehat{a}_1, \widehat{a}_2]$  – вектор оцениваемых параметров;  $\mathbf{y}^T = [t, 1]$  – вектор факторных переменных; индекс «т» обозначает транспонирование.

Тогда аппроксимирующей оценкой (обозначим ее как  $\widehat{\ddot{x}}_D$ ) для сигнала  $\ddot{x}_D$  будет

$$\widehat{\ddot{x}}_D = -g \int_t \omega_{ДУС} dt + \widehat{a}_1 t + \widehat{a}_2. \quad (19)$$

Следует отметить, что в выражении (18) не учтено слагаемое  $(l_D - l)\ddot{\varphi}$  исходного равенства (14). Это соответствует опыту исследований замкнутой системы управления с законом формирования заданной скорости (20) при разных значениях параметров: в силу быстрой сходимости к нулю процесса  $\ddot{\varphi} \rightarrow 0$  и свойств самонастройки системы управления оценка этого слагаемого слабо влияет на результирующую динамику движения. Более того, такое решение порождает некоторое опережение оценки  $\widehat{\ddot{x}}_D$  в сравнении с  $\ddot{x}_D$ , что дает более устойчивое поведение замкнутой системы управления с естественными задержками.

В качестве алгоритма текущей идентификации применяется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [17]:

$$\begin{cases} \widehat{\theta}_i = \widehat{\theta}_{i-1} + \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i = z_i - \widehat{\theta}_{i-1}^T \mathbf{y}_i; \\ \mathbf{P}_i = \left[ \mathbf{P}_{i-1} - \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} (\beta + \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i)^{-1} \right] / \beta; \\ \mathbf{P}_0 = \vartheta \mathbf{E}_2; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (20)$$

где индекс  $i = 1, 2, 3, \dots$  означает  $i$ -й момент времени с временным шагом  $\Delta t$ ;  $\varepsilon$  – невязка идентификации;  $\mathbf{P}_i$  – ковариационная матрица ошибок оценивания параметров ( $2 \times 2$ );  $\beta$  – назначаемый фактор забывания предыдущих измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами;  $\vartheta$  – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров;  $\mathbf{E}_2$  – единичная ( $2 \times 2$ ) матрица.

Заметим, что алгоритм идентификации (20) использует гарантированно линейно независимые факторные переменные на любом интервале времени. Это обеспечивает устойчивость получаемых оценок и в целом устойчивость применяемого алгоритма идентификации [18].

Исходя из изложенного, вместо закона (15) можно записать закон формирования заданной скорости на текущих оценках  $\hat{\Phi}_{уст}$ ,  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_2$ ,  $\hat{\ddot{x}}_д$  в соответствии с выражениями (16), (18)–(20):

$$\dot{x}_T \approx v_{зад} = T_x^{-1} \left( x_{T\text{зад}} - (l_{\max} - h_{зад}) \hat{\Phi}_{уст} - x_T \right) - 0,25 T_x \xi_M^{-2} \left( -g \int_t \omega_{ДУС} dt + \hat{a}_1 t + \hat{a}_2 \right). \quad (21)$$

Также в соответствии с рекомендациями [18] желательно применить к закону (21) низкочастотный фильтр для устранения в замкнутой системе высокочастотных составляющих с сохранением точности управления. Такие движения могут возникнуть из-за двухмаятникового подвеса, образованного крюком и грузом в некоторых случаях [10].

Невязка идентификации алгоритма (20) при линейной независимости элементов вектор-функции  $y_i$  на скользящем временном интервале (а это, как указывалось, гарантированно), на достаточно малом шаге  $\Delta t$  и при соответствующем выборе значения параметра  $\beta$  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 [18]. Таким образом, алгоритм (20) обеспечивает условие

$$\hat{\ddot{x}}_д \rightarrow \ddot{x}_д, \quad (22)$$

т. е. аппроксимацию переменной  $\ddot{x}_д$  даже при неточности текущих оценок параметров.

А это значит, что с самого начала работы алгоритма идентификации оценки можно подставлять в закон (21). Отсюда также следует справедливость приведенного в работе [11] доказательства по достижению цели управления для текущих оценок параметров и  $\hat{\ddot{x}}_д$ .

Исходя из предложенного алгоритмического обеспечения адаптивной системы управления тележкой крана предлагается в качестве датчиков информации и дополнительных алгоритмических построений использовать следующие:

– энкодер на тележке крана либо  $x_T \approx \int_t v_{зад} dt + x_{T_0}$  в силу отмеченных выше свойств

сервопривода, где последнее слагаемое – это начальное значение положения тележки;

– совмещенный датчик в виде акселерометра и датчика угловой скорости, закрепленный на канате подвеса в месте, близком к тележке крана на расстоянии  $l_д$  (см. рис. 3) аналогично предложенному авторами патента [3], в точке Д подвеса; акселерометр используется для формирования сигнала  $\hat{\Phi}_{уст}$  по формуле (16), датчик угловой скорости дает сигнал  $\omega_{ДУС}$ ;

– для формирования сигнала  $\hat{\ddot{x}}_д$ , используемого в равенстве (18), предлагается использовать фильтрацию на реальном дифференцирующем звене сигнала  $v_{зад} + l_д \omega_{ДУС}$ , что дает приближенное получение искомого сигнала без влияния дрейфа датчика угловой скорости [15].

Следует отметить, что полученные выводы соответствуют условию относительной малости радиуса инерции груза  $l^2 \gg r_T^2$ . Исследования на имитационных компьютерных моделях показывают, что в противном случае, например  $l = r_T$ , рассмотренная выше замкнутая система управления обеспечивает также высокое качество управления. Это объясняется, в частности, хорошими аппроксимационными свойствами алгоритма идентификации (20), обеспечивающего условие (22).

### 3. МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Для сравнения предлагаемого подхода с предложенным ранее решением из статьи [11] проведение имитационного моделирования предлагаемой системы управления проводилось в аналогичных условиях, что и в указанной работе, даже с некоторым расширением вариации параметров крана и груза. В частности, моделирование осуществлялось в компьютерной среде Matlab/Simulink/SimMechanics. Дифференциальные уравнения решались методом Рунге – Кутты четвертого и пятого порядков с шагом 0,01 с. Для этого использовались зависимости (1), (18)–(21) с учетом выражений (5)–(7), (12), (13), (16).

Рассматривалось управление тележкой типового среднего крана со значениями параметров  $m_T = 450$  кг,  $m_T = 100 \div 50\,000$  кг,  $l_{\min} = 3$  м,  $l_{\max} = 15$  м,  $l_д = 1$  м,  $r_T = 0,2 \div 5$  м,  $x_{T\text{зад}} = 10$  м,  $h_{зад} = 0$ . Сила трения моделировалась в виде вязкого трения:  $f_{тр} = k_{тр} v$ ,  $k_{тр} = 0,3$  Н·с/м. Сервопривод, формирующий скорость перемещения тележки крана  $\dot{x}_T$  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/с<sup>2</sup>. Многие из указанных значений параметров соответствуют стандарту [19] и многообразию типовых переносимых грузов. Закон формирования заданной скорости (21) фильтровался на аperiodическом звене с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 1 с.

Предполагалось, что на переносимый груз в момент времени 50 с действует ступенчатое ветровое возмущение интенсивностью 5 % от веса груза, соответствующее  $\varphi_{\text{уст}} = 2,9^\circ$  («ступенька» сглажена аperiodическим звеном с постоянной времени 1 с).

Считалось, что угловая скорость и линейное ускорение измеряются с помощью микромеханического датчика типа MPU-6050. В этих данных присутствуют центрированные гауссовские шумы со среднеквадратическими ошибками по угловой скорости 0,1 град/с, а по ускорению 0,1 м/с<sup>2</sup>,  $\Delta\omega_{\text{др}} = 0,03$  с<sup>-1</sup> [20]. Также предполагалось постоянное смещение показаний акселерометра («нуль» акселерометра) величиной 0,17 м/с<sup>2</sup>, которое соответствует неточности угловой выставки акселерометра величиной около 1°. Линейное перемещение тележки  $x_t$  определялось энкодером с аналогичным шумом со среднеквадратической ошибкой 0,01 м.

Для алгоритма идентификации (20) приняты следующие значения параметров:  $\Delta t = 0,01$  с, с таким же временным шагом реализуется закон (21);  $\vartheta = 10$ ;  $\beta = 0,985$ . В алгоритме идентификации вместо переменной  $\ddot{x}_d$  использовалась ее приближенное описание (считается истинным), полученное исходя из зависимости  $\ddot{x}_d(s) \approx \frac{s}{0,5s+1}(v_{\text{зад}}(s) + l_d \omega_{\text{ДУС}}(s))$ , где  $s$  – переменная преобразования Лапласа.

В представленных вариантах работы крана собственная его частота в соответствии с соотношениями (5) изменяется в диапазоне  $\omega_0 = 0,8 \div 1,8$  с<sup>-1</sup> или  $T_0 = 3,49 \div 7,85$  с. Поэтому значения параметров закона (21) с учетом выражений (12), (13) приняты такими:  $\xi_m = 0,9$ ,  $k_{\text{шт}} = 2/3$ ,  $\omega_m = 0,2$  с<sup>-1</sup>,  $T_x = 10$  с. Зависимость (17) реализована в виде  $\hat{\varphi}_{\text{уст}}(s) \approx \frac{1}{2s+1}(\ddot{x}_d^{\text{акс}}(s)/g)$ .

Поведение замкнутой системы управления по переменным  $x_t$  и  $x_r$  сравнивалось с переменной  $x_m$ , которая является выходом модели, соответствующей эта-

лонному движению (7) с указанными выше параметрами:  $\ddot{x}_m = -2\omega_m \xi_m \dot{x}_m - \omega_m^2(x_m - \tilde{x}_{r\text{зад}}(l))$ .

На рис. 4 представлены результаты исследования при средних значениях параметров работы крана при минимальной длине подвеса  $l = 3$  м:  $m_r = 5000$  кг,  $r_r = 2$  м. При других значениях двух последних параметров из указанного выше их диапазона кривые получаются практически такими же (расхождение – единицы процентов).

На рис. 5 представлены результаты исследования при средних параметрах работы крана при максимальной длине подвеса  $l = 15$  м:  $m_r = 5000$  кг,  $r_r = 2$  м. Так же, как и в предыдущем случае, при других значениях двух последних параметров из указанного выше их диапазона получаются практически такие же кривые. Постоянная ошибка позиционирования груза в целевой точке составляет около 0,28 м. Если ошибки в угловой выставке акселерометра в совмещенном датчике не будет, то и указанной ошибки позиционирования также не будет.

На других длинах подвески результаты имеют промежуточный характер. Можно утверждать, что результаты модельных исследований подтверждают изложенные выше теоретические выкладки. Они показывают, что при большом разнообразии параметров груза его перемещение близко к поведению назначенного эталона с достижением целевой точки на высоте погрузки с небольшой ошибкой, пропорциональной неточности угловой выставки акселерометра в совмещенном датчике (наличии нескомпенсированного «нуля» акселерометра). При возникновении ступенчатого ветрового воздействия оно парируется. При этом присутствует текущая неопределенность указанных параметров. Линейное перемещение груза близко к «эталонному». Время переходного процесса при переносе груза на 10 м составляет около 25 с. Угловое отклонение подвеса груза не более 2°. Подобные свойства без изменения алгоритма управления были получены и при других значениях параметров крана.

Указанная постоянная ошибка позиционирования груза также будет возникать, если вместо энкодера для определения сигнала  $x_t$  использовать интегрирование  $v_{\text{зад}}$ . Но в целом эта ошибка не критична, если описанная система управления краном подразумевает наличие в своем контуре оператора крана, т. е. представляет собой автоматизированную систему. Оператор, наблюдая за положением груза, формирует через органы управления дополнительный сигнал заданной скорости по отношению к сигналу, формируемому в соответствии с законом (21), компенсируя эту постоянную ошибку. Причем в этом случае сигнал  $\Delta x_r$  в формулах (12), (13) определяется управляющим воздействием оператора.

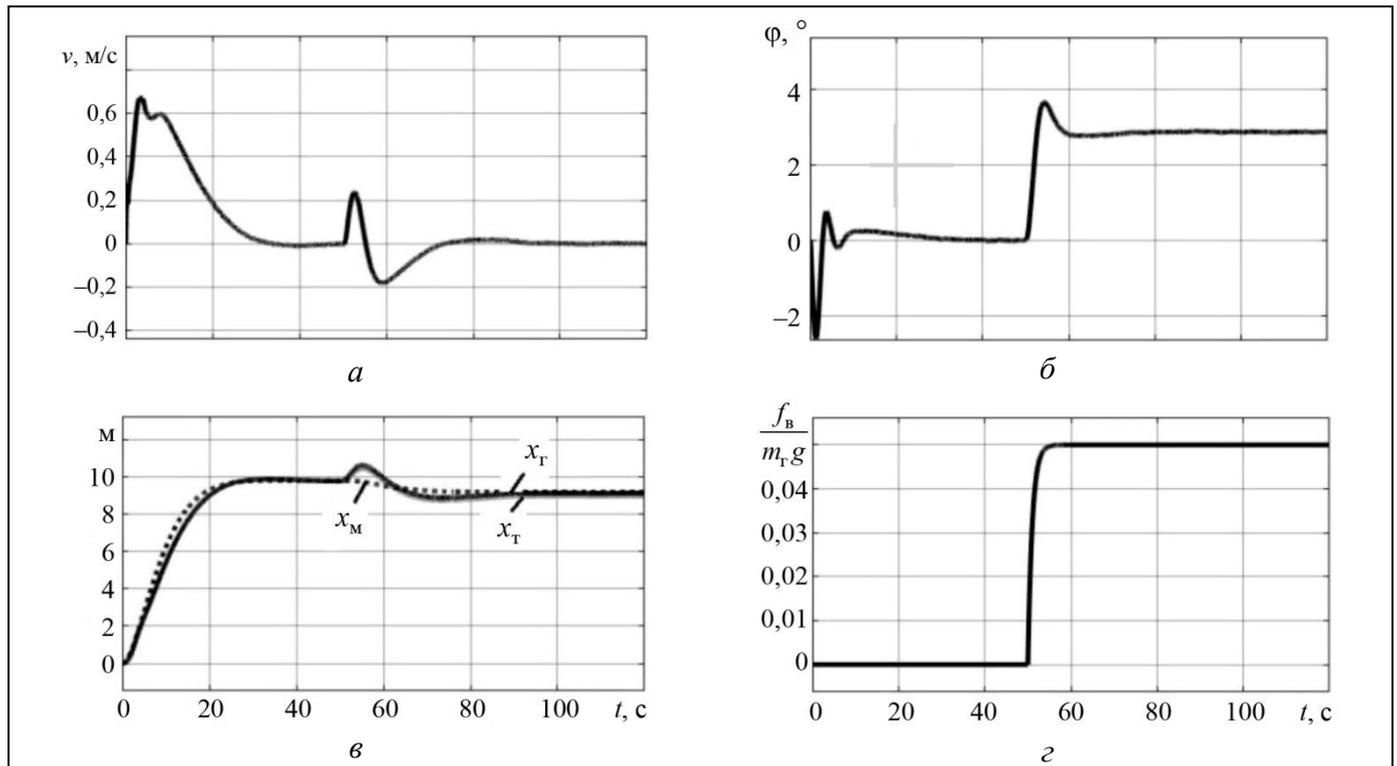


Рис. 4. Результаты модельных исследований адаптивной системы управления для среднего мостового крана при минимальной длине подвеса груза (3 м):  $a$  – скорость тележки;  $б$  – угол отклонения подвеса;  $в$  – линейные перемещения тележки, груза и выхода эталона;  $г$  – относительная сила ветра

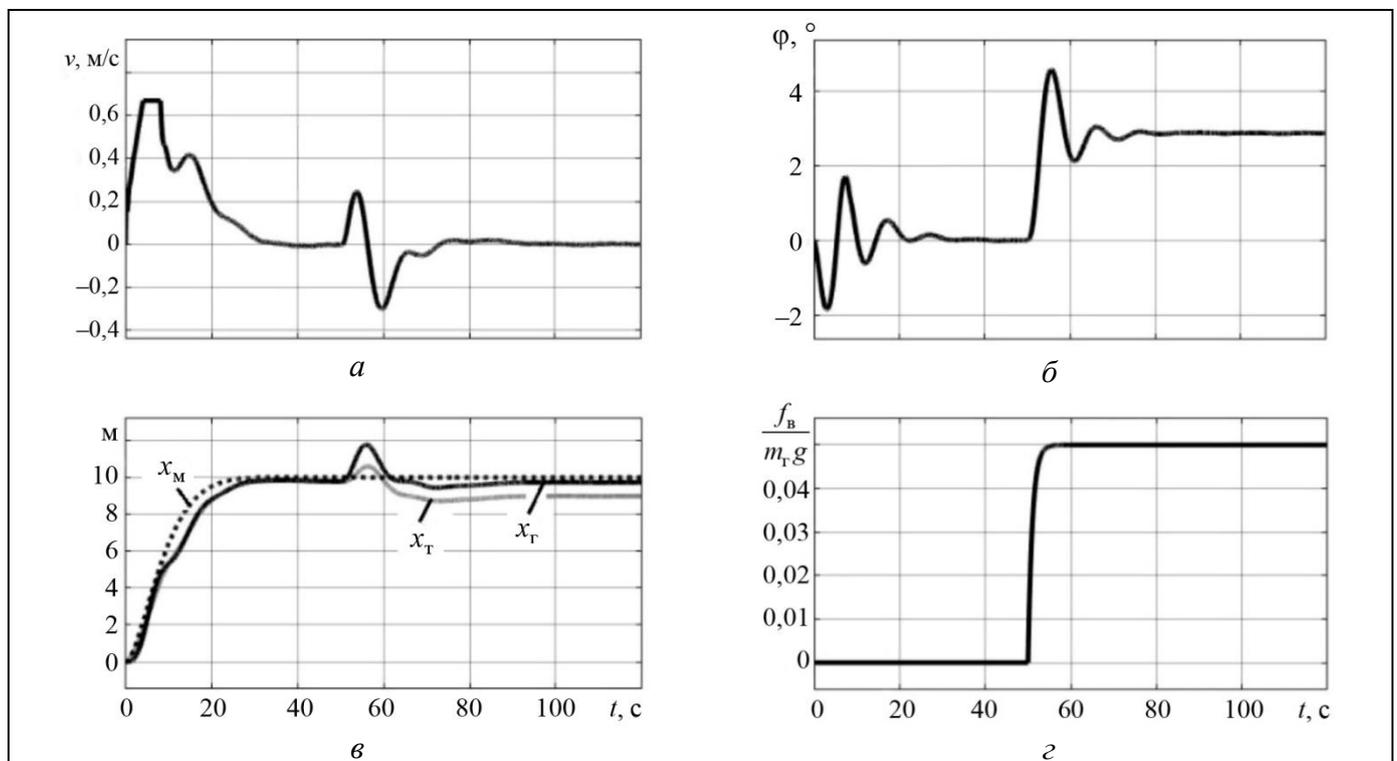


Рис. 5. Результаты модельных исследований адаптивной системы управления для среднего мостового крана при максимальной длине подвеса груза (15 м):  $a$  – скорость тележки;  $б$  – угол отклонения подвеса;  $в$  – линейные перемещения тележки, груза и выхода эталона;  $г$  – относительная сила ветра



Представленные результаты указывают на то, что предлагаемый способ построения системы управления в сравнении с подходом, описанным в работе [11], обладает схожими свойствами по качеству управления перемещением груза, гашением маятниковых колебаний и парирования возмущения.

Рассматриваемые алгоритмы управления краном были также апробированы на экспериментальной установке по исследованию успокоения груза на кранах мостового типа с асинхронными сервоприводами [21] и продемонстрировали аналогичные свойства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показывают эффективность представленного решения по идентификационному управлению мостовым краном и возможность его реализации на современном оборудовании. Предлагаемый подход позволяет сформировать управление, обладающее свойствами, аналогичными описанному в работе [11], но при этом он дает дополнительные преимущества:

- безопасное, более надежное и менее затратное для эксплуатации расположение датчиков информации;

- применение эффективной процедуры текущей параметрической идентификации на основе метода наименьших квадратов с гарантированным обеспечением устойчивости этого алгоритма;

- возможность выбора параметров закона управления на основе паспортных данных крановой установки;

- отсутствие требования настройки системы управления перед каждым началом работы по определению дрейфа датчика угловой скорости. Это позволяет использовать в системе управления недорогие датчики среднего класса.

Если система управления краном предназначена для автоматизированного управления им, то предполагается настройка системы управления только на этапе ее монтажа на крановую установку (возможна также периодическая уточняющая настройка на плановых регламентных работах):

- определение «нуля» акселерометра с целью его вычитания из текущих показаний для устранения постоянной ошибки позиционирования груза;

- выбор значения параметра  $k_{\text{шт}}$  и определение зависимости  $T_x(\Delta x_r)$  согласно выражениям (12), (13) и паспортным данным крановой установки для закона формирования заданной скорости (21);

- выбор и апробирование значений параметров алгоритма текущей идентификации;

- установка значений параметров указанных выше низкочастотных фильтров.

Если система управления краном предполагает его полностью автоматическое управление, то дополнительно требуется использовать акселерометр с высокой стабильностью «нуля» либо применять периодическую его коррекцию с помощью специальных процедур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jaafar, H.I., Mohamed, Z., MohdSubha, N.A., et al. Efficient Control of a Nonlinear Double-Pendulum Overhead Crane with Sensorless Payload Motion Using an Improved PSO-Tuned PID Controller // Journal of Vibration and Control. – 2018. – No. 25(4). – P. 907–921.
2. Fadlalla, A.A.M., Hassan M. Dynamic Modeling and Feedback Linearization Control of a 3-D Overhead Gantry Crane System // Proceedings of 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS). – Toronto, ON, Canada, 2021. – P. 1–6.
3. Патент RU 2676210 C1 Устройство и способ управления раскачиванием груза, подвешенного на подъемном устройстве: № 2016125496: заявл. 06.11.2014: опублик. 26.12.2018, Бюл. № 36 / Саварежи С.М., Винати Ф., Винати С.В. и др. [Patent RU 2676210 C1 Ustrojstvo i sposob upravljeniya raskachivaniem gruzha, podveshennogo na pod'emnom ustrojstve: № 2016125496: zayavl. 06.11.2014: opubl. 26.12.2018, Byul. no. 36 / Savarezi, S.M., Vinati, F., Vinati, S.V., et al. (In Russian)]
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. [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. 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. – Vol. 17, no. 4. – P. 2182–2189.
6. Drag, L. Model of an Artificial Neural Network for Optimization of Payload Positioning in Sea Waves // Ocean Engineering. – 2016. – Vol. 115. – P. 123–134.
7. Qiang, H.Y., Sun, Y.G., Lyu, J.C., and Dong, D.S. Anti-Sway and Positioning Adaptive Control of a Double-Pendulum Effect Crane System with Neural Network Compensation // Frontiers in Robotics and AI. – 2021. – Vol. 8, art. no. 639734.
8. Guo, W., Liu, D., Yi, J., Zhao, D. Passivity-based-control for double-pendulum-type overhead cranes // Proceedings of IEEE region 10 annual international conference. – Chiang Mai, Thailand, 2004. – P. 546–549.
9. Sun, N., Fang, Y., Wu, Y., and Chen, H. Adaptive Positioning and Swing Suppression Control of Underactuated Cranes Exhibiting Double-Pendulum Dynamics: Theory and Experimentation // Proceedings of 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation. – Wuhan, China, 2016. – P. 87–92.
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. [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. – P. 451-461. (In Russian)]
11. *Круглов С.П., Ковыршин С.В.* Идентификационное скоростное управление мостовым краном с сокращенной моделью переноса груза. Проблемы управления. – 2023. – № 4. – С. 28–37. [*Kruglov, S.P., and Kovyrshin, S.V.* Identification-Based Speed Control of an Overhead Crane with a Reduced Cargo Transfer Model // *Control Sciences*. – 2023. – No. 4. – P. 25–33.]
  12. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА-Принт, 2010. – 320 с. [*German-Galkin, S.G.* Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0: Uchebnoe posobie. – SPb.: KORONA-Print, 2010. – 320 s. (In Russian)]
  13. *Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А.* Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с. [*Chernous'ko, F.L., Anan'evskii, I.M., Reshmin S.A.* Metody upravleniya nelineinymi mekhanicheskimi sistemami. – M.: Fizmatlit, 2006. – 328 s. (In Russian)]
  14. *Жегульский В.П., Лукашук О.А.* Проектирование, конструирование и расчет механизмов мостовых кранов: учебное пособие / под ред. Г.Г. Кожушко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 184 с. [*Zhegul'skii, V.P., Lukashuk, O.A.* Proektirovanie, konstruirovaniye i raschet mekhanizmov mostovyykh kranov: uchebnoe posobie / pod red. G.G. Kozhushko. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016. – 184 s. (In Russian)]
  15. *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)]
  16. *Нормативы времени на погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые на железнодорожном, водном и автомобильном транспорте.* – URL: <https://legalacts.ru/doc/normativy-vremeni-na-pogruzochno-razgruzochnye-raboty-vypolnjaemye-na/?ysclid=lupk0hbixq562099001> (дата обращения 07.04.2024). [*Normativy vremeni na pogruzochno-razgruzochnye raboty, vypolnyaemye na zhelezнодорожном, vodnom i avtomobil'nom transporte.* – URL: <https://legalacts.ru/doc/normativy-vremeni-na-pogruzochno-razgruzochnye-raboty-vypolnjaemye-na/?ysclid=lupk0hbixq562099001> (accessed April 7, 2024). (In Russian)]
  17. *Льонг 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. – Prentice Hall PTR, 1987. – 544 p.]
  18. *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 MG TU GA. – 2012. – 248 s. (In Russian)].
  19. *ГОСТ 3332-54.* Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т среднего и тяжелого режимов работы. Основные параметры и размеры. – М: Издательство стандартов, 1974. [*GOST 3332-54.* Krany mostovye ehlektricheskie obshchego naznacheniya gruzopod"emnost'yuot 5 do 50 t srednego i tyazhelogorezhimovraboty. Osnovnye parametry i razmery. – M: Izdate'l'stvo standartov, 1974. (In Russian)]
  20. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4* – Sunnyvale, CA: InvenSense, Inc., 2013. – URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (accessed April 5, 2024).
  21. *Ковыршин С.В., Круглов С.П., Буторин Д.В., Коденев К.Ф.* Экспериментальная установка для разработки и исследования алгоритмов успокоения груза на кранах мостового типа с системой управления на основе промышленных элементов // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». – 2023. – № 3 (21). – URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1503> (дата обращения 07.04.2024). [*Kovyrshin, S.V., Kruglov, S.P., Butorin, D.V., Kodenev, K.F.* Eksperimental'naya ustanovka dlya razrabotki i issledovaniya algoritmov uspokoeniya gruz na kranakh mostovogo tipa s sistemoi upravleniya na osnove promyshlennykh ehlementov // *Ehlektronnyinauchnyizhurnal «MolodayanaukaSibiri»* – 2023. – No. 3 (21). – URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1503> (accessed April 7, 2024). (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии С. А. Красновой.*
- Поступила в редакцию 12.04.2024,  
после доработки 28.06.2024.  
Принята к публикации 15.07.2024.*
- Круглов Сергей Петрович** – д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, ✉ [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9241-3352>
- Ковыршин Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, ✉ [sergkow@mail.ru](mailto:sergkow@mail.ru), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5564-0951>
- Буторин Денис Витальевич** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, ✉ [den\\_butorin@mail.ru](mailto:den_butorin@mail.ru), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1160-5756>
- © 2024 г. Круглов С. П., Ковыршин С. В., Буторин Д. В.



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



# AN IDENTIFICATION-BASED CONTROL METHOD FOR AN OVERHEAD CRANE WITH A NEW COMBINED SENSOR PLACEMENT

S. P. Kruglov\*, S. V. Kovyshin\*\*, and D. V. Butorin\*\*\*

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

\*✉ kruglov\_s\_p@mail.ru, \*\*✉ sergkow@mail.ru, \*\*\*✉ den\_butorin@mail.ru

**Abstract.** This paper is devoted to an automatic control method for an overhead crane under the current parametric uncertainty of the crane, transported cargo, and exogenous disturbances. The control objective is to move the cargo in the horizontal plane to a point ensuring the final delivery of the cargo to the designated place while parrying the angular oscillations of the suspension and reaching given dynamic characteristics. 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. The control law generates a given trolley speed for the servo drive. The passport data of the crane installation are used to select the control law parameters. Unlike previous publications on the topic, the solution proposed below is simpler, more reliable in terms of operation, and less expensive. This is achieved by placing a combined sensor (an accelerometer with an angular rate sensor (ARS)) on a suspension cable near the crane trolley and applying, first, an algorithmic solution without the preliminary calculation of the ARS drift and, second, a current parametric identification procedure of higher efficiency. Computer simulation results are provided to confirm these advantages of the new solution. A similar example is implemented on an experimental installation.

**Keywords:** overhead crane, control automation, current parametric uncertainty, parametric identification algorithm, approximation.

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