

УДК 621.865.8; 681.51

С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов

Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки

Предлагается способ автоматического управления по скорости перемещения тележки крана мостового типа с прямым отслеживанием горизонтального перемещения груза в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений. Цель управления – точное позиционирование переносимого груза с гашением его маятниковых колебаний и парирование внешних возмущений. Описывается динамика мостового крана при перемещении тележки по одной оси. Предлагаемый метод управления основан на схеме адаптивного управления с идентификатором и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости. Доказана устойчивость замкнутой системы управления и определены условия для этого. Для текущей идентификации параметров груза используется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. Данный метод управления разрабатывался специально для исследования и отладки на экспериментальной установке, поэтому все параметры крана и груза при расчётах были приближены к макету. Приведены результаты компьютерного моделирования предложенного способа управления с различными массоинерционными свойствами груза, длины его подвеса и возмущениями в программной среде MatLab Simulink. Результаты показали высокую эффективность предложенной адаптивной системы управления. Она обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, предотвращает раскачивание груза во время ускорения и торможения тележки, а также способна парировать внешнее возмущение, например воздействие ветра, требует минимальных начальных настроек. Разработанный подход может быть рекомендован для любых крановых установок, использующих подвешенный груз.

Ключевые слова: адаптивная система управления, мостовой кран, эталонная модель, закон управления, парирование внешних возмущений, идентификационный алгоритм, устойчивость замкнутой системы управления.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92

Одним из основных направлений в развитии грузоподъемного оборудования, в частности, грузовых кранов мостового типа, является автоматизированное управление позиционированием и гашением маятниковых колебаний груза, разработка качественно новых и модернизация существующих способов управления. На сегодняшний день опубликовано большое количество работ по данной тематике [1–12].

В работах [1–4] для решения проблемы раскачивания груза во время его транспортировки предлагается использовать ПИД-регулирование и ПД-регулирование с предварительной настройкой коэффициентов под заранее известные параметры крана и груза. В [5] описывается способ управления с модернизированным ПД-регулятором с сигмоидальной функцией. В работах [6, 7] предлагается подход с управлением на основе нечеткой логики, который не всегда справляется с «нештатными» ситуациями и всем спектром возмущений. В [8, 9] предлагается решение с управлением на основе скользящих режимов в сочетании с нейроконтроллером и нечетким управлением. Нейроконтроллеры требуют длительного обучения и не обеспечивают качество управления при непредвиденных возмущениях. В [10] описывается подход с адаптивным управлением, однако идентификация параметров крана осуществляется до самого перемещения груза. Это может отрицательно сказаться на управлении при изменении параметров крана или возникновении внешних возмущений во время переходного процесса.

Одним из перспективных направлений данного направления является разработка адаптивной системы управления. Преимуществом данного подхода

является то, что для управления крановым механизмом адаптивная система управления с идентификационным алгоритмом не требует полной информации о параметрах крана, переносимого груза и возмущениях. Их определение может происходить в текущий момент времени, что значительно упрощает предварительную настройку автоматической системы управления. Изменение указанных параметров связано с различием массы и габаритов груза, длины троса, который удерживает груз, а также воздействием ветра, переменной силой трения тележки при передвижении и др.

Настоящая работа направлена на модернизацию ранее предложенной адаптивной системы управления мостовым краном и, в частности, нацеленной на непосредственное отслеживание горизонтального перемещения груза на заданной высоте в назначенную точку в условиях текущей неопределенности параметров системы управления и внешних возмущений [11, 12]. Указанные системы управления построены по схеме с текущей параметрической идентификацией (идентификатором), с неявным эталоном и на основе «упрощенных» условий адаптируемости [13].

Основным отличием настоящей работы от [11, 12] является использование в качестве условного управляющего сигнала скорости перемещения тележки крана вместо прикладываемого к ней усилия со стороны привода. Такое решение оправдано, если в качестве привода тележки крана используется сервопривод или шаговый двигатель. Также эта постановка упрощает реализацию системы управления, в частности, становится проще алгоритм текущей

идентификации из-за уменьшения числа искомым параметров. Кроме того, в этой работе приводится доказательство устойчивости замкнутой системы управления.

В статье рассматривается перемещение груза только по одной оси мостового крана, поскольку принцип управления перемещением груза по второй оси аналогичен и не требует отдельного рассмотрения.

Уравнение динамики объекта управления

Математическое описание динамики мостового крана при перемещении тележки по одной оси хорошо изучено, см., например, [15]. Схема движения тележки крана и перемещение груза представлена на рис. 1.

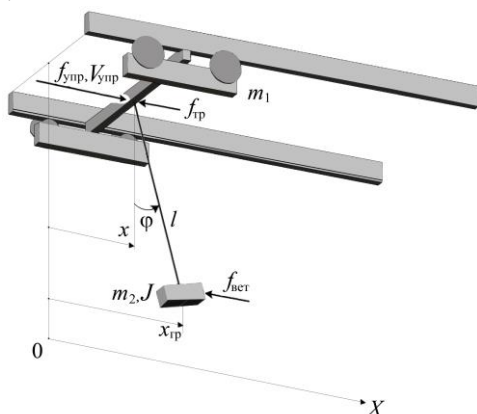


Рис. 1. Схема перемещения груза по одной оси

На рис. 1 введены следующие обозначения: тележка с линейным перемещением x по оси X с массой m_1 ($V_{\text{упр}} = V = \dot{x}$ – скорость перемещения тележки, она же – условный управляющий сигнал, в силу использования сервопривода или шагового двигателя); на тележку действуют управляющая сила $f_{\text{упр}}$ и сила трения $f_{\text{тр}}$; груз массой m_2 и центральным моментом инерции J ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра $f_{\text{вет}}$; груз связан с тележкой с помощью гибкой подвески длиной l ; φ – угол отклонения троса от вертикальной оси; $x_{\text{тр}}$ – координата перемещения груза по оси X .

Если считать управляющим воздействием силовое воздействие от привода, то уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка–маятник», без учета массы троса и трения углового движения (в силу их малости), а также без учета начальных значений переменных по положению и скорости, описываются как [15]

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + (m_2 l \cos \varphi)\ddot{\varphi} = f_{\text{упр}} + m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - k_x \dot{x} - f_{\text{с.тр}}; \\ (m_2 l \cos \varphi)\ddot{x} + (m_2 l^2 + J)\ddot{\varphi} = -m_2 g l \sin \varphi - l f_{\text{вет}} \cos \varphi; \\ x_{\text{тр}} = x + l \sin \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; указанные производные переменных взяты по времени (t); $f_{\text{с.тр}}$ – сила сухого трения; k_x – коэффициент вяз-

кого трения поступательного перемещения тележки; указанные выше параметры в общем случае являются переменными и заранее неизвестными (за исключением параметров g , m_1 и $m_{2\text{max}}$ – максимальной массы груза).

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типичное значение $|\varphi| < 30^\circ$), малую скорость углового перемещения и физику движения, примем следующие упрощения: $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \approx 0$. С учетом этих упрощений система (1) переписывается относительно переменных \ddot{x} , $\ddot{\varphi}$ и $x_{\text{тр}}$ в виде

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{\text{упр}} + a_{x2} \varphi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\varphi} \approx a_{\varphi1} f_{\text{упр}} + a_{\varphi2} \varphi + a_{\varphi3} \dot{x} + a_{\varphi4}; \\ x_{\text{тр}} \approx x + l \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_{x1} &= \gamma^{-1} (m_2 l^2 + J); & a_{x2} &= \gamma^{-1} g (m_2 l)^2; \\ a_{x3} &= -\gamma^{-1} (m_2 l^2 + J) k_x; \\ a_{x4} &= \gamma^{-1} [-(m_2 l^2 + J) f_{\text{с.тр}} + m_2 l^2 f_{\text{вет}}]; \\ a_{\varphi1} &= -\gamma^{-1} m_2 l; & a_{\varphi2} &= -\gamma^{-1} (m_1 + m_2) m_2 g l; \\ a_{\varphi3} &= \gamma^{-1} m_2 l k_x; & a_{\varphi4} &= \gamma^{-1} l [m_2 f_{\text{с.тр}} - (m_1 + m_2) f_{\text{вет}}]; \\ \gamma &= [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2) J]. \end{aligned}$$

Из последнего равенства системы (2) на основании первых двух уравнений получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой [12]:

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx a_1 f_{\text{упр}} + a_2 \varphi + a_3 \dot{x} + a_4, \quad (3)$$

где $a_1 = a_{x1} + l a_{\varphi1}$; $a_2 = a_{x2} + l a_{\varphi2}$; $a_3 = a_{x3} + l a_{\varphi3}$; $a_4 = a_{x4} + l a_{\varphi4}$.

Для вывода уравнения динамики перемещения груза в зависимости от скорости тележки выполним следующее: из первой зависимости системы (2) выразим значение $f_{\text{упр}}$ и подставим его в (3), получим, с учетом того, что $(a_3 - a_1 a_{x3} / a_{x1}) = 0$,

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx a_1^V \dot{V} + a_2^V \varphi + a_3^V, \quad (4)$$

где

$$a_1^V = a_1 / a_{x1} = J / (J + m_2 l^2), \quad 1 \geq a_1^V > 0,$$

$$a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2} / a_{x1}), \quad a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4} / a_{x1}).$$

Далее это уравнение, описывающее динамику перемещения груза, будем использовать в качестве объекта управления с формированием управляющего воздействия в виде изменения скорости перемещения тележки $V = V_{\text{упр}}$ с учетом φ и оценок параметров (4), доставляемых алгоритмом идентификации, для обеспечения перемещения груза в заданную точку и гашения угловых колебаний.

Закон управления

В соответствии с методологией синтеза управления, изложенной в [13], в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта [16]:

$$\ddot{x}_M = a_{M1}\dot{x}_M + a_{M0}(x_M - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}), \quad x_M(t_0) = x_{\text{Гр}}(t_0), \quad (5)$$

где x_M – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ; $x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}$ – заданное значение $x_{\text{Гр}}$, или назначенное место доставки груза (целевая точка), формируемое оператором крана с помощью органов управления краном; выбираемые параметры эталонной модели: $a_{M1} = -2\xi_M\omega_M$; $a_{M0} = -(\omega_M)^2$; $\xi_M > 0$ – эталонное значение относительного коэффициента затухания; $\omega_M = 0,5\sqrt{g/\tilde{l}_{30\%}} > 0$ – эталонное значение собственной частоты (смысл этого назначения поясняется далее); $\tilde{l}_{30\%}$ – оценка длины подвеса груза с погрешностью не хуже $\pm 30\%$, получаемая, например, интегрированием скорости вертикального перемещения груза (приблизительно постоянна) с коррекцией в крайних точках [12]; t_0 – начальный момент времени.

Предположим, что динамика движения груза вместо уравнения (4) описывается как

$$\ddot{x}_{\text{Гр}} \cong a_{M1}\dot{x}_{\text{Гр}} + a_{M0}(x_{\text{Гр}} - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}), \quad (6)$$

что соответствует динамике назначенной эталонной модели (5). Рассмотрим, как этого добиться путем формирования закона управления – условного управляющего сигнала.

Подставляя в уравнение (4) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя $\dot{x}_{\text{Гр}}$ на \dot{x} , чтобы устранить внутреннюю неустойчивость [12], определяем условный управляющий сигнал $V_{\text{упр}}$, вычисленный при точных значениях параметров объекта (точный закон управления):

$$TV_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -a_{M1}^{-1} \left[a_{M0}(x_{\text{Гр}} - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}) - a_2^V \phi - a_3^V \right], \quad (7)$$

где $T = -a_1^V/a_{M1}$.

Из полученной зависимости следует, что искомым условным управляющим сигналом можно получить путем фильтрации сигнала, описываемого правой частью (7), на апериодическом звене $1/(Ts+1)$, где s – переменная преобразования Лапласа. Поскольку параметр a_1^V положительный, а параметр a_{M1} отрицательный, то $T > 0$, отсюда обеспечивается внутренняя устойчивость формирования $V_{\text{упр}}$ в зависимости от правой части (7).

Если закон управления (7) подставить в (4), то получим уравнение движения замкнутой системы управления

$$\ddot{x}_{\text{Гр}} - a_{M1}\dot{x}_{\text{Гр}} - a_{M0}(x_{\text{Гр}} - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}) \approx -a_{M1}l\phi. \quad (8)$$

Или через уравнение несоответствия замкнутой системы управления заданной эталонной модели

(ошибки управления): $e \triangleq x_M - x_{\text{Гр}}$, на основании (8) и (5)

$$\ddot{e} - a_{M1}\dot{e} - a_{M0}e \approx a_{M1}l\phi, \quad e(t_0) = 0. \quad (9)$$

В силу устойчивости назначенной эталонной модели, левые части равенств (8) и первого из (9) описываются устойчивым дифференциальным уравнением. Поэтому если в процессе управления обеспечивается условие $\phi \rightarrow 0$, то налицо асимптотическая тождественность поведения замкнутой системы управления назначенному эталону. Докажем, что закон управления (7) обеспечивает это в целевой точке.

Заметим, что из (8) непосредственно следует, что условие: $x_{\text{Гр}}(t_0) = x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}$, $\phi(t_0) = 0$ – соответствует устойчивому состоянию замкнутой системы управления, а $x_{\text{Гр}}(t_0) \neq x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}$, $\phi(t_0) = 0$ – началу движения груза в сторону целевой точки. Запишем уравнение (8) в виде

$$\ddot{x}_{\text{Гр}} - a_{M1}\dot{x}_{\text{Гр}} - a_{M0}x_{\text{Гр}} \approx -a_{M0}\tilde{x}_{\text{Гр}}^{\text{зад}}, \quad (10)$$

где $\tilde{x}_{\text{Гр}}^{\text{зад}} = x_{\text{Гр}}^{\text{зад}} + (a_{M1}/a_{M0})l\phi$ означает «зону притяжения» с центральной точкой $x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}$ для переменной $x_{\text{Гр}}$ в указанном движении в силу очевидной ограниченности величины $|l\phi| \approx |\dot{x}_{\text{Гр}} - \dot{x}|$ и устойчивости назначенного эталона.

Нахождение груза внутри этой зоны можно также описать неравенством $|x_{\text{Гр}} - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}| \leq |(a_{M1}/a_{M0})l\phi|$. Для его анализа запишем (8) через переменную x с учетом (5)

$$\ddot{x} - a_{M1}\dot{x} - a_{M0}(x - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}) \approx -l(\ddot{\phi} + \omega_M^2\phi).$$

Известно (см., например, [15]), что угловое движение идеального маятника (будем им считать груз на подвесе с перемещающимся основанием) описывается равенством $\ddot{\phi} + \omega_0^2\phi \equiv 0$, где ω_0 – текущая собственная частота колебаний груза. Вычтем из правой части последнего равенства указанный нуль, умноженный на $(-l)$, найдем, что замкнутая система управления также описывается равенством

$$\ddot{x} - a_{M1}\dot{x} - a_{M0}(x - x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}) \approx l(\omega_0^2 - \omega_M^2)\phi. \quad (11)$$

Отсюда следует, что при условии $\omega_M < \omega_0$, в силу устойчивости левой части этого равенства, движение тележки будет в ту же сторону от $x_{\text{Гр}}^{\text{зад}}$, в

какую при колебании отклонился груз (см. рис. 1), причем с темпом, не превышающим темп изменения φ . А это значит, что поведение тележки направлено на гашение колебаний. То есть при колебании груза внутри указанной выше «зоны притяжения» $\dot{\varphi} \rightarrow 0$.

А это по (8) дает $x_{\text{тр}} \rightarrow x_{\text{тр}}^{\text{зад}}$.

Таким образом, уравнения (8)–(11) и представленные логические рассуждения указывают (при условии $\omega_M < \omega_0$) на диссипативное поведение замкнутой системы управления на начальном этапе движения груза в плане приближения к свойствам назначенного устойчивого эталона и асимптотически устойчивое состояние системы в конечной целевой точке: $\dot{\varphi} \rightarrow 0$, $x_{\text{тр}} \rightarrow x_{\text{тр}}^{\text{зад}}$. Последнее также влечет устойчивость состояния в целевой точке всей системы управления краном.

В качестве ω_0 при назначении ω_M можно использовать собственную частоту математического маятника с неподвижным основанием, т.к. вышеприведенные рассуждения строились для области целевой точки груза. Известно, что значение последней определяется как $\sqrt{g/l}$. Отсюда, с учетом ошибки определения длины подвеса, следует смысл приведенной выше зависимости для ω_M .

Полученный закон управления (7) построен при условиях, что параметры объекта управления (a_1^V, a_2^V, a_3^V) известны. Однако по условию решаемой задачи они не определены. Для поиска оценок указанных параметров по (4) в текущем времени используем алгоритм идентификации с лучшими идентифицирующими свойствами, способный оценивать переменные по времени – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [17]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - \mathbf{y}_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ \mathbf{P}_i = \left[\mathbf{P}_{i-1} - \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} (1 + \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i)^{-1} \right] / \beta; \\ \mathbf{P}_0 = \beta \mathbf{E}_2; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (12)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ обозначает дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$ – вектор искомых оценок; верхний индекс «Т» означает транспонирование; $\mathbf{y}_i = [\varphi_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i – невязка идентификации; z_i – отклик объекта, в данном случае это $(\ddot{x}_{\text{тр}} - \hat{a}_1^V \dot{\varphi})_i$; оценка \hat{a}_1^V будет назначаться постоянной в силу свойств замкнутой адаптивной системы управления, построенной на «упрощенных» условиях адаптируемости [13]? и известных диапазонов этой оценки [см. (4)]; \mathbf{P}_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2); β – назначаемый фактор забывания прошедших

измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами; ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; \mathbf{E}_2 – единичная (2×2) матрица.

Закон управления с учетом оцениваемых параметров объекта управления вместо их действительных величин в отличии от (7) имеет вид:

$$\hat{T} \dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -a_{M1}^{-1} \left[a_{M0} (\hat{x}_{\text{тр}} - x_{\text{тр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \varphi - \hat{a}_3^V \right], \quad (13)$$

где $\hat{T} = -\hat{a}_1^V / a_{M1}$, $\hat{x}_{\text{тр}} = \int_0^t V_{\text{упр}}(t) dt + \hat{l}_{30\%} \varphi$.

Как показано в работах [12, 13], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям

$$\text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); \quad \left| a_1^V \right| / 2 \leq \hat{a}_1^V \leq \left| \hat{a}_1^V \right|_{\max}; \quad d\hat{a}_1^V / dt \rightarrow 0, \quad (14)$$

где $\left| \hat{a}_1^V \right|_{\max} \geq 2 \left| a_1^V \right|$ – верхнее ограничение указанной оценки, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления. Поэтому эта оценка выбрана постоянной с экспериментальным выбором максимального ее значения.

Для того чтобы распространить выводы по устойчивости замкнутой системы управления при точном законе управления (7) на систему управления с реальным законом (13), выполним следующее. В силу быстрой сходимости невязки идентификации в алгоритме (12) буквально с первых шагов работы алгоритма (доказательство см. в [13]) уравнение объекта управления (4) можно переписать как

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx \hat{a}_1^V \dot{\varphi} + \hat{a}_2^V \varphi + \hat{a}_3^V.$$

Подставляя сюда закон управления (13), мы получим те же рассуждения и выводы, которые приведены для зависимостей (8)–(11), что доказывает устойчивость замкнутой системы управления с законом управления, построенным на оценках.

Результаты моделирования

Моделирование системы управления выполнялось в программной среде MatLab/Simulink. Параметры объекта управления принимались в соответствии с разработанным макетом мостового крана [14]: $m_t = 0,85$ кг; длина троса во время конкретного исследования неизменна. На макете мостового крана для измерения переменных $\dot{\varphi}$ и $\ddot{x}_{\text{тр}}$ используется MEMS гироскоп-акселерометр (GY-521, построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и ускорения по трем осям [18]), установленный на трос выше на 5 см места крепления троса с грузом (около груза). Сигнал φ определялся интегрированием измеренного $\dot{\varphi}$. Определение переменной x осуществляется по количеству управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки), а \dot{x} – интегрированием измеренного \ddot{x} с помощью

второго MEMS гироскоп-акселерометра, установленного на тележку. В соответствии с этим шумы измерения переменных ϕ , $\ddot{x}_{гр}$ и \ddot{x} считались гауссовскими центрированными, со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 град/с; 0,1 м/с².

Параметры эталонной модели (4): $\xi_M = 0,9$; $\omega_M = 2,28 \text{ с}^{-1}$ (собственная частота неподвижного подвеса при его длине 0,55 м: $\sqrt{9,81/0,55} \approx 4,2 \text{ с}^{-1}$). Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 0,5$ м. Параметры алгоритма идентификации (12) и закона управления (13): $\Delta t = 0,01 \text{ с}$; $\theta = 10$; $\beta = 0,99$.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений смоделировано воздействие ветра на

подвешенный груз. Это воздействие начинается в момент времени 7,5 с, имеет ступенчатый вид и пропорционально массе груза.

В результате предварительных исследований системы управления и на основании соотношений, экспериментально была определена величина $\bar{a}_1^V = \left| \bar{a}_1^V \right|_{\max} \equiv 10a_1^V$ (другие значения этой оценки из диапазона (14) практически не изменяют качества управления).

На рис. 2 представлен результат исследования функционирования системы управления при параметрах груза: $m_2 = 0,85 \text{ кг}$, $J = 0,00204 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,55 \text{ м}$.

На рис. 3 представлен результат исследования функционирования системы управления при параметрах груза: $m_2 = 2 \text{ кг}$, $J = 0,0048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,8 \text{ м}$.

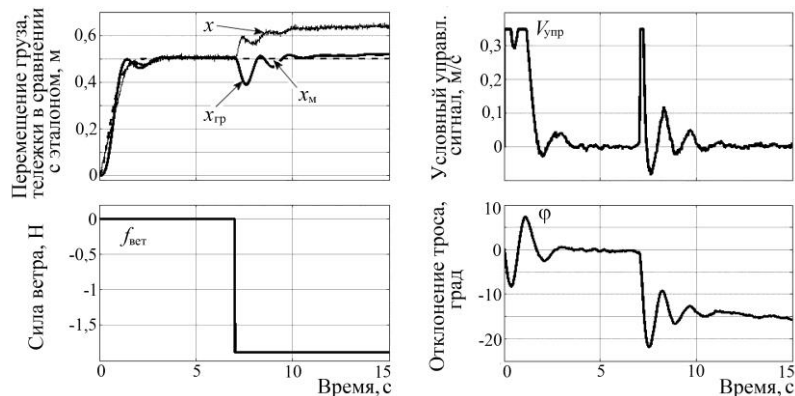


Рис. 2. Переходный процесс системы управления ($m_2 = 0,85 \text{ кг}$, $J = 0,00204 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,55 \text{ м}$)

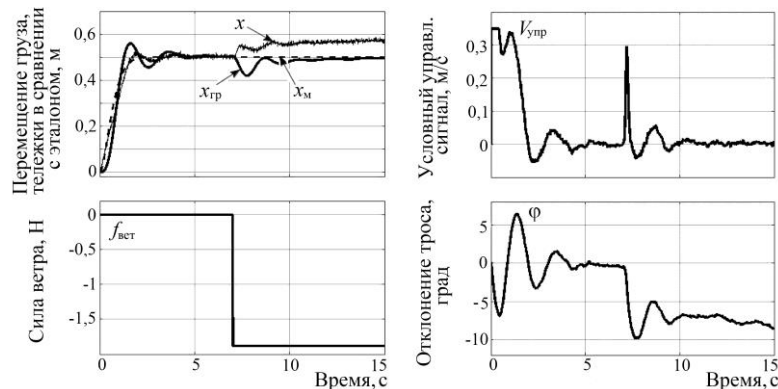


Рис. 3. Переходный процесс системы управления ($m_2 = 2 \text{ кг}$, $J = 0,0048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,8 \text{ м}$)

Как видим, при значительных изменениях параметров системы управления получаем быстрое гашение угловых колебаний груза и доставку его в целевую точку (время переходного процесса около 3 с), а также парирование внешнего возмущения.

Подобные результаты были получены при других параметрах груза, длины подвеса груза и внешних возмущениях.

Заключение

Представлена модернизация адаптивного закона управления мостового крана с реализацией управления по скорости. Доказана устойчивость замкнутой

системы управления. Это позволяет упростить алгоритмическое обеспечение системы управления, в частности, за счет уменьшения количества оцениваемых параметров алгоритмом идентификации.

Результаты исследования показывают высокую эффективность предложенной системы управления. Данный закон управления обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, гасит колебания груза, которые возникают во время ускорения и торможения тележки, и способен парировать внешнее возмущение. При этом система требует минимальных начальных настроек.

Так как данная модификация подхода адаптивного управления с прямым отслеживанием за перемещением груза показала высокое качество управления при моделировании в программной среде Matlab Simulink, то следующим шагом работы в данном направлении является исследование системы управления на макете мостового крана [14].

Литература

1. Коротков М.С. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана / М.С. Коротков, В.С. Щербаков, Е.О. Шершнева // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 1(53). – С. 12–19.
2. Рогова Н.С. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном / Н.С. Рогова, В.Д. Юркевич // Сб. науч. трудов НГТУ. – 2015. – № 3. – С. 43–54.
3. Саблина Г.В. Разработка алгоритма стабилизации системы «подвешенный груз» / Г.В. Саблина, Д.И. Ходакова // Сб. науч. трудов НГТУ. – 2009. – № 3(57). – С. 33–40.
4. Воевода А.А. Синтез регулятора для системы «перевернутый маятник–тележка» / А.А. Воевода, В.В. Вороной, Е.В. Шоба // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 4(49). – С. 161–165.
5. Антипов А.С. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции / А.С. Антипов, С.А. Краснова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 609–614.
6. Петренко Ю.Н. Исследование работы крана с контроллером нечёткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Энергетика. Белорус. нац. техн. ун-т. – 2011. – № 3. – С. 20–25.
7. Ухоботов В.И. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечёткого алгоритма управления / В.И. Ухоботов, В.С. Величко // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 18–23.
8. Chen Z.M. Intelligent anti-swing control for bridge crane / Z.M. Chen, W.J. Meng, J.G. Zhang // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19, No. 10. – P. 2774–2781.
9. Ngo Q.H. et al. Fuzzy sliding mode control of container cranes // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2015. – Vol. 13, No. 2. – P. 419–425.
10. Fang Y. et al. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system // IEEE Transactions on control systems technology. – 2012. – Vol. 20, No. 1. – P. 241–248.
11. Круглов С.П. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, И.Е. Ведерников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4. – С. 114–122.
12. Круглов С.П. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза / С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682–688.
13. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 125 с.
14. Аксаментов Д.Н. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 288–292.
15. Черноусько Ф.Л. Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
16. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2015. – 624 с.
17. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.invensense.com>, свободный (дата обращения: 14.11.2019).

Круглов Сергей Петрович

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС)
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
ORCID: 0000-0001-9241-3352
Тел.: 8-950-111-83-69
Эл. почта: kruglov_s_p@mail.ru

Аксаментов Дмитрий Николаевич

Аспирант каф. автоматизация производственных процессов ИрГУПС
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
Тел.: 8-950-061-82-09
Эл. почта: Gaastra104@mail.ru

Kruglov S.P., Aksamentov D.N.

Adaptive control of the overhead crane by the trolley speed

A method is proposed for automatic control of the speed of an overhead-type crane trolley with direct tracking of the horizontal movement of load in conditions of current uncertainty of load parameters and external disturbances. The purpose of the control is to find the precise positioning of the transported cargo with the damping of its pendulum oscillations and the parrying of external disturbances. The dynamics of an overhead crane when moving a trolley along one axis is described. The proposed control method is based on an adaptive control scheme with an identifier and an implicit reference model using «simplified» adaptability conditions. The stability of a closed control system is proved and the conditions for this are determined. For the current identification of load parameters, the recursive least squares method with a forgetting factor is used. This control method was developed specifically for research and debugging on an experimental layout, so all the parameters of the crane and load were approximated to the layout during calculations. The results of computer simulation the proposed control method with different mass-inertial properties of the load, the length of its suspension and perturbations in the Matlab Simulink software environment are presented. The results showed the high efficiency of the proposed adaptive control system. It ensures accurate movement of the load in a short period of time, prevents the load from swinging during acceleration and braking of the cart, and is also able to fend off external disturbances, for example, the impact of

wind. The developed approach can be recommended for any crane installations using a suspended load.

Keywords: adaptive control system, overhead crane, control law, parrying external disturbances, identification algorithm, stability of a closed control system.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92

References

1. Korytov M.S., Shherbakov V.S., Shershneva E.O. *Obosnovanie znachenij koeffitsientov reguljatorov gasheniya kolebanij gruza mostovogo krana* [Substantiation of the values of the coefficients of the regulators for damping the oscillations of the load of the overhead crane], *Vestnik SibADI*, 2017, no. 1(53), pp. 12–19 (in Russ.).

2. Rogova N.S., Jurkevich V.D. *Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshheniya gruza portal'ny'm kranom* [Development of control algorithms for moving load by a portal crane]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*, 2015, no. 3, pp. 43–54 (in Russ.).

3. Sablina G.V., Hodakova D.I. *Razrabotka algoritma stabilizacii sistemy «podveshennyj gruz»* [Development of an algorithm for stabilizing the "suspended load" system]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*, 2009, no. 3(57), pp. 33–40 (in Russ.).

4. Voevoda A.A., Voronov V.V., Shoba E.V. *Sintez reguljatora dlya sistemy «perevernutyj mayatnik – telezhka»* [Synthesis of the controller for the "inverted pendulum-trolley" system], *Nauchnyj vestnik NGTU*, 2012, no. 4(49), pp. 161–165 (in Russ.).

5. Antipov A.S., Krasnova S.A. *Sistema stabilizacii polozheniya telezhki krana s ispol'zovaniem sigmoidal'noj funkcii* [System for stabilizing the position of the crane truck using the sigmoid function]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614 (in Russ.).

6. Petrenko Yu.N., Alavi S.E., Aleksandrovskij S.V. *Issledovanie raboty krana s kontrollerom nechyotkoj logiki na osnove trexmernoj imitacionnoj modeli* [Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model], *Energy*, Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, 2011, no. 3, pp. 20–25 (in Russ.).

7. Uxobotov V.I., Velichko V.S. *Stabilizaciya matematicheskogo mayatnika s osnovaniem na kolese s pomoshh'yu nechyotkogo algoritma upravleniya* [Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm]. *Vestnik YuUrGU*, 2014, vol. 14 no. 2, pp. 18–23 (in Russ.).

8. Chen Z.M. Intelligent anti-swing control for bridge crane / Z.M. Chen, W.J. Meng, J.G. Zhang, *Journal of Central South University*, 2012, vol. 19, no. 10, pp. 2774–2781.

9. Ngo Q.H. and at. Fuzzy sliding mode control of container cranes. International. *Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 419–425.

10. Fang Y. and at. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 241–248.

11. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Vedernikov I.E. *Adaptivnoe upravlenie peremeshheniem gruza mostovym kranom s identifikacionnym algoritmom* [The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*, 2017, no. 4, pp. 114–122 (in Russ.).

12. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. *Metod adaptivnogo upravleniya mostovym kranom s pryamy'm otslezhivaniem peremeshheniya gruza* [A method of adaptive control of an overhead crane with direct tracking of the load movement]. *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2020, no. 21(12), pp. 682–688 (in Russ.).

13. Kruglov S.P. *Usloviya adaptiruемости sistem upravleniya s identifikatorom i e'talonom* [The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a reference model], Monograph. Saarbrücken, Deutschland, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012, 125 p. (in Russ.).

14. Aksamentov D.N., Kruglov S.P., Kovyrshin S.V. *Ustanovka po issledovaniyu algoritmov uspokoeniya kolebanij gruza mostovogo krana* [Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms]. *Transport infrastructure of the Siberian region*, 2019, vol. 2, pp. 288–292 (in Russ.).

15. Chernous'ko F.L., Anan'evskij I.M., Reshmin S.A. *Metody upravleniya nelinejny'mi mexanicheskimi sistemami* [Control methods of nonlinear mechanical systems]. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p. (in Russ.).

16. Pervozvanskij A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory course], textbook for universities. Saint-Petersburg, Lan', 2015. 624 p. (in Russ.).

17. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. University of Linköping, Sweden, 1991, 432 p.

18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p. Available at: <http://www.invensense.com>, free (Accessed: November 14, 2019).

Sergey P. Kruglov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automation of production operations,
Irkutsk State Transport University (ISTU)
15, Chernyshevskogo, Irkutsk, Russia, 664074
ORCID: 0000-0001-9241-3352
Phone: +7-950-111-83-69
Email: kruglov_s_p@mail.ru

Dmitriy N. Aksamentov

Postgraduate student, Department of Automation
of production operations, ISTU
15, Chernyshevskogo, Irkutsk, Russia, 664074
Phone: +7-950-061-82-09
Email: Gaastra104@mail.ru