

С. П. Круглов, д-р техн. наук, проф., kruglov_s_p@mail.ru,
Д. Н. Аксаментов, аспирант, Gaastra104@mail.ru,
Иркутский государственный университет путей сообщения

Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза

Предлагается метод автоматического управления мостовым краном, нацеленный на непосредственное отслеживание горизонтального перемещения груза на заданной высоте в назначенную точку в условиях текущей априорной неопределенности параметров груза и внешних возмущений. К последним относятся воздействия ветра, изменения трения перемещения тележки крана и др. Рассматриваемый в статье подход заменяет решение двух традиционных задач: отслеживание перемещения тележки крана в заданную точку и демпфирование угловых колебаний груза. Кроме того, предлагаемый метод управления основан на схеме адаптивного управления, включающей идентификатор, неявную эталонную модель и использование "упрощенных" условий адаптируемости. Последние сводятся лишь к требованию сходимости невязки идентификации при функционировании алгоритма текущей идентификации и к выбору в определенном диапазоне постоянной оценки коэффициента при управлении. Эта оценка выбирается достаточно большой по модулю, чтобы обеспечить наибольший запас устойчивости замкнутой системы управления по амплитуде с обеспечением требуемого качества управления. Для текущей параметрической идентификации предлагается использовать рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. Эталонная модель назначается в виде колебательного звена с собственной частотой, не превышающей таковую для объекта управления с неподвижным основанием и находящейся в экспериментально установленном диапазоне. Для уточнения собственной частоты эталона требуется оценка длины подвеса груза с точностью не хуже 30 %. Предложен простейший алгоритм для получения такой оценки. Он основан на средней скорости вертикального перемещения груза, которая, как правило, приблизительно известна. Приведены результаты компьютерных исследований эффективности предлагаемой адаптивной системы управления на основе параметров разработанной экспериментальной установки мостового крана с учетом характеристик типовых датчиков информации и приводов. Данный подход показал высокую эффективность в широком диапазоне вариантов груза и возмущений. Он может являться основой для создания реальных систем управления кранами любых типов, работающих с подвешенным грузом.

Ключевые слова: мостовой кран, демпфирование колебаний, алгоритм текущей идентификации, адаптивная система управления, закон управления, эталонная модель

Введение

Роль мостовых кранов в современной промышленности, транспорте и других областях сложно переоценить. Однако для повышения эффективности их использования требуется автоматизация, направленная на гашение маятниковых колебаний груза, парирование внешних возмущений, причем в условиях априорной неопределенности параметров объекта управления и возмущений. Решению этой актуальной задачи в разных ее постановках посвящено немалое число работ, например [1–17].

В статье [1] предлагается использовать модернизированный ПД регулятор с сигмоидальной функцией, в работе [2] — принцип модального управления, в статье [3] предполагается дополнительное устройство для гашения колебаний на основе настраиваемого ПИД регулятора. В работе [4] авторы предлагают формировать закон управления на основе заранее назначенной эталонной траектории перемещения груза. Однако эти и им подобные работы предполагают наличие априорной информации о параметрах крана и возмущений, либо об отсутствии последних. Известно, что данные регуляторы не обеспечивают должного качества управления при значительном многообразии вариантов груза, длины троса и внешних возмущений.

В работе [5] предлагается метод управления краном со свойствами робастности, однако он может иметь разное время сходимости процессов в замкнутой системе управления, что является критичным для практики. В работе [6] реализован метод управления с частичной адаптируемостью к весу переносимого груза, но он не решает задачу по адаптивному управлению в полном объеме. Много предлагаемых решений подразумевают предварительную настройку системы управления перед использованием крана, поэтому не способны обеспечить качественное парирование колебаний в условиях текущей априорной неопределенности (см., например, [7]).

Работы [8, 9] связаны с использованием нечеткого управления, которое не способно качественно решать задачу управления в условиях неконтролируемых возмущений. Имеются решения задачи управления кранами на основе скользящих режимов, в том числе, в сочетании с нечетким управлением и нейроконтроллерами, представленные например, в работах [10–12]. Данные системы отличаются робастными свойствами к переменным параметрам объекта и возмущениям, но связаны практически с постоянным возбужденным состоянием системы, что влечет дополнительные расходы на управление и быстрое расходование ресурса приводов.

Известны подходы с текущим оцениванием неизвестных параметров системы управления [13, 14]. Управление строится в два этапа: на первом формируется "S-траектория" тележки, на втором реализуется энергетически оптимальный адаптивный закон управления для реализации указанной траектории. Процедура синтеза закона управления использует градиентный алгоритм идентификации параметров закона, что является недостатком. Это связано с проблемами выбора параметров алгоритма идентификации для конкретных случаев, а также низкими идентифицирующими свойствами. Подобными свойствами обладает подход, рассмотренный в работе [15], предлагающий строить адаптивный закон управления краном на основе использования функции Ляпунова.

В работе [16] предлагается использовать адаптивную систему управления с идентификационным алгоритмом. С его помощью в начальный момент времени оцениваются параметры крана, затем строится закон управления с использованием функции Ляпунова. Поскольку идентификация параметров крана происходит только в начальный момент времени, закон управления не может учитывать текущую неопределенность.

Известно решение проблемы адаптивной автоматизации управления мостовым краном с текущей идентификацией параметров объекта управления, синтезом закона управления на основе этих оценок и заданной неявной эталонной модели [17]. Основой решения являются "упрощенные" условия адаптируемости [18]. Однако данная система управления основана на раздельном управлении тележкой мостового крана и угловым движением подвеса груза.

Настоящая работа является логическим продолжением работы [17] и увязывается с адаптивным отслеживанием непосредственно перемещения груза — одновременным решением задач перемещения груза на требуемое расстояние и гашения колебаний. Это упрощает построение адаптивной системы управления в условиях текущей априорной неопределенности, дает более качественное решение указанных задач.

Уравнение динамики объекта управления

Математическое описание мостового крана при перемещении груза по одной оси достаточно хорошо изучено в работе [5]. Схема этого движения представлена на рис. 1.

На рис. 1 введены следующие обозначения: тележка крана массой m_1 с линейным перемещением по оси X ; на тележку действует управляющая сила $f_{упр}$ и сила трения $f_{тр}$ (вязкое и сухое трение); груз массой m_2 и центральным моментом инерции J ; на груз действует гори-

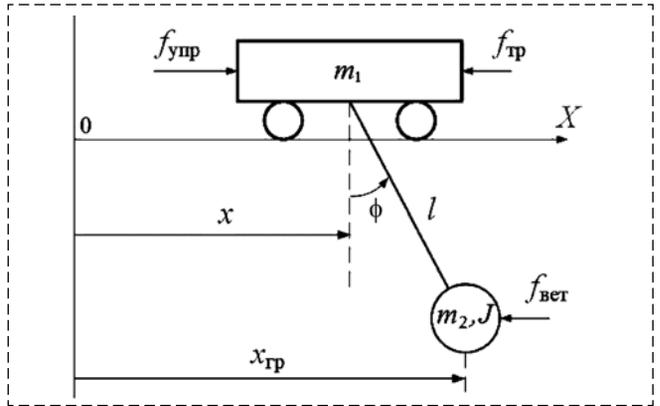


Рис. 1. Схема движения крана по одной оси
Fig. 1. The scheme of crane movement along one axis

зонтальная сила ветра $f_{вет}$; груз связан с тележкой с помощью подвески — троса длиной l (будем считать $l = \text{const}$, максимальное значение этого параметра обозначим l_{max}); ϕ — угол отклонения троса от вертикальной оси; x — расстояние, пройденное тележкой; $x_{гр}$ — расстояние, пройденное грузом в измерении по оси X ; примем, что $x_{гр}$ измеряется при максимальной длине подвески: $l = l_{\text{max}}$.

Если не учитывать массу троса и трение углового перемещения в силу их малости, а также начальные значения переменных по положению и скорости, уравнения поступательного и вращательного движения системы "тележка—груз" можно представить в виде [5]

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

где g — ускорение свободного падения; производные переменных взяты по времени t ; $f_{с.тр}$ — сила сухого трения; k_x — коэффициент вязкого трения линейного перемещения тележки; указанные параметры в общем случае являются заранее неизвестными и, возможно, переменными (за исключением g , m_1 , l_{max}).

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типичное значение $|\phi| < 30^\circ$), малую скорость углового перемещения и физические законы движения, примем следующие упрощения: $\sin \phi \approx \phi$, $\cos \phi \approx 1$, $\dot{\phi}^2 \sin \phi \approx 0$. С учетом этого систему (1) перепишем относительно переменных \ddot{x} , $\ddot{\phi}$ и $x_{гр}$ в виде [17]

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{упр} + a_{x2} \phi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\phi} \approx a_{\phi1} f_{упр} + a_{\phi2} \phi + a_{\phi3} \dot{x} + a_{\phi4}; \\ x_{гр} \approx x + l_{\text{max}} \phi, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_{x1} &\triangleq \gamma^{-1}(m_2 l^2 + J); \quad a_{x2} \triangleq \gamma^{-1} g(m_2 l)^2; \\ a_{x3} &\triangleq -\gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)k_x; \\ a_{x4} &\triangleq \gamma^{-1}[-(m_2 l^2 + J)f_{c.тр} + m_2 l^2 f_{вет}]; \\ a_{\phi 1} &\triangleq -\gamma^{-1} m_2 l; \quad a_{\phi 2} \triangleq -\gamma^{-1}(m_1 + m_2)m_2 g l; \\ a_{\phi 3} &\triangleq \gamma^{-1} m_2 l k_x; \\ a_{\phi 4} &\triangleq \gamma^{-1} l[m_2 f_{c.тр} - (m_1 + m_2)f_{вет}]; \\ \gamma &\triangleq [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2)J]. \end{aligned}$$

Приближенное описание динамики в виде (2) обосновано также использованием последующей аппроксимации (2) и (1) за счет оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей идентификации.

Последнее из равенств (2) можно записать в виде

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

где

$$\begin{aligned} a_1 &\triangleq a_{x1} + l_{\max} a_{\phi 1}; \quad a_2 \triangleq a_{x2} + l_{\max} a_{\phi 2}; \\ a_3 &\triangleq a_{x3} + l_{\max} a_{\phi 3}; \quad a_4 \triangleq a_{x4} + l_{\max} a_{\phi 4}. \end{aligned}$$

В силу исходной установки на прямое слежение за перемещением груза уравнение (3) далее будем считать объектом управления и использовать его как исходное при синтезе закона управления.

Закон управления

Поскольку динамика объекта управления соответствует колебательному процессу, то в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, примем неявную модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта:

$$\ddot{x}_m = a_{m1} \dot{x}_m + a_{m0}(x_m - x_{гр}^{зад}), \quad (4)$$

где x_m — переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ; $x_{гр}^{зад}$ — заданное значение $x_{гр}$, или целевое место доставки груза; выбираемые параметры эталонной модели: $a_{m1} \triangleq -2\xi_m \omega_m$; $a_{m0} \triangleq -(\omega_m)^2$; ξ_m , ω_m — эталонные значения относительного коэффициента затухания и собственной частоты, соответственно [19].

Очевидно, что собственная частота эталонной модели не может быть больше такой же для объекта управления, иначе это противоречит физическим законам движения объекта управления и усложняет управление. В области целевой точки $x_{гр}^{зад}$ объект управления

близок к маятнику с неподвижным основанием, собственная частота которого равна $\sqrt{g/l}$. Поэтому примем

$$\omega_{m \min} \leq \omega_m \leq \sqrt{g/l}, \quad (5)$$

где $\omega_{m \min}$ — ограничение ω_m снизу по условиям быстродействия системы управления. Уточнение этой зависимости будет приведено далее.

Отметим, что если правая часть уравнения (3) описывается в соответствии с назначенным эталоном (4), тогда, в силу принятых условий и соотношений (2), динамика объекта будет близка к эталонной модели:

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

Далее, подставляя в уравнение (3) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя $\dot{x}_{гр}$ на \dot{x} (этот момент будет рассмотрен далее), определяем идеальное управляющее воздействие $f_{упр}$, построенное на точных значениях параметров объекта (a_1, a_2, a_3, a_4):

$$\begin{aligned} f_{упр} \approx a_1^{-1}[(a_{m1} - a_3)\dot{x} + \\ + a_{m0}(x_{гр} - x_{гр}^{зад}) - a_2 \phi - a_4]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для поиска в текущем времени оценок указанных параметров будем использовать алгоритм идентификации (идентификатор) — рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [20]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1}] / \beta; \\ P_0 = \vartheta E_3; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (8)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ — указывает на дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}, \hat{a}_{3i}, \hat{a}_{4i}]^T$ — вектор искомых оценок; индекс T означает транспонирование; $y_i \triangleq [\phi_i, \dot{x}_i, 1]^T$ — вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i — невязка идентификации; $z_i \triangleq \ddot{x}_{гр i} - \hat{a}_1 f_{упр i}$ — отклик объекта, где оценка \hat{a}_1 определяется отдельно (показано ниже); P_i — матричный (3×3) коэффициент усиления алгоритма; β — назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами; ϑ — положительное число, задающее начальную скорость изменения оценок; E_3 — единичная (3×3) матрица.

Предположим, что через малый промежуток времени работы системы невязка идентификации будет близка к нулю ($\varepsilon \cong 0$), тогда в соответствии с системой (8) можно в непрерывном времени записать вместо соотношения (3):

$$\ddot{x}_{гр} \approx \hat{a}_1 f_{упр} + \hat{a}_2 \phi + \hat{a}_3 \dot{x} + \hat{a}_4. \quad (9)$$

Это дает возможность строить закон управления, сформированный вместо (7) на текущих оценках параметров объекта управления:

$$f_{\text{упр}} \approx \hat{a}_1^{-1}[(a_{m1} - \hat{a}_3)\dot{x} + a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2\phi - \hat{a}_4]. \quad (10)$$

На основании работы [21] этот закон управления в замкнутой системе управления обеспечит $\varepsilon \xrightarrow{\text{E}} 0$, а значит справедливость (9), если

$$\text{sign}(\hat{a}_1) = \text{sign}(a_1); |a_1|/2 \leq |\hat{a}_1| \leq |\hat{a}_1|_{\text{max}}; \quad (11)$$

$$d\hat{a}_1/dt \rightarrow 0,$$

где $|\hat{a}_1|_{\text{max}} \geq 2|a_1|$ — верхнее ограничение оценки параметра a_1 , которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления.

Для выполнения последнего условия проанализируем параметр a_1 . Из соотношений (2), (3) и условия $J \triangleq \eta m_2$, где $\eta > 0$ — коэффициент [22], следует, что

$$m_1^{-1} \geq a_1 = (m_1\chi + m_2)^{-1} > 0; \quad (12)$$

$$\chi \triangleq 1 + l^2/h \geq 1.$$

Замечание 1. Особенность выбора ω_m . Из опыта исследования адаптивной системы управления (3), (4), (8), (10) установлено (по крайней мере, для рассматриваемой ниже установки), что наилучшее качество адаптивного управления при наибольшем быстродействии обеспечивается в случае, если частоту эталонной модели (5) задавать как $\omega_m \approx (0,4 \div 0,6)\sqrt{g/l}$. Если назначить

$$\omega_m = 0,5\sqrt{g/\hat{l}_{30\%}}, \quad (13)$$

где $\hat{l}_{30\%}$ — оценка длины подвеса груза с погрешностью не хуже $\pm 30\%$ от истины, то условие (13) будет удовлетворять указанному диапазону для ω_m . В силу такого слабого требования к точности оценки длины подвеса последнюю можно определять, например, по следующему простому соотношению:

$$\hat{l} = \hat{l}_0 + l'_{\text{cp}}(t_{\text{спуска}} - t_{\text{подъема}}),$$

где \hat{l}_0 — начальное значение оценки; l'_{cp} — средняя скорость подъема/спуска груза (положительная величина, считается известной); $t_{\text{подъема}}$, $t_{\text{спуска}}$ — время подъема или спуска груза соответственно — измеряемые величины (считаем, что подъем и спуск происходит гораздо медленней остальных процессов).

Замечание 2. Замена сигнала $\dot{x}_{\text{гр}}$ на \dot{x} при выводе закона управления (7) и (10) обусловлена тем, чтобы структура системы с управлением (7) или (10) соответствовала структуре объекта управления (3), а также исходных для него зависимостей (2). В противном случае появляется внутренняя неустойчивость. Такая

замена не вносит большого рассогласования с введенным эталоном (4), поскольку сигнал $\dot{x}_{\text{гр}}$ отличается от \dot{x} только угловой составляющей $l_{\text{max}}\dot{\phi}$, поэтому эта замена дает отличие только на переходных процессах.

Для устранения внутренней неустойчивости многомерного исходного объекта (2) также нужно использовать достаточно большую оценку \hat{a}_1 , что снижает размах управления (10). Это, в свою очередь, соответствует снижению общего коэффициента усиления в контуре замкнутой системы управления и повышению запаса устойчивости по амплитуде [19]. Поэтому на основании (11) с учетом (12) рассматриваемую оценку целесообразно представлять в виде

$$|\hat{a}_1| \equiv |\hat{a}_1|_{\text{max}} = \text{const} \quad (14)$$

и исключать из алгоритма идентификации (8).

Результаты моделирования

Основные параметры объекта управления приняты в соответствии с разработанным макетом мостового крана [23]: $m_1 = 2$ [кг]; $|f_{\text{упр}}| \leq \leq 10$ [Н]; $l = l_{\text{max}} = 1,5$ [м]. На макете для измерения переменных ϕ и $\dot{x}_{\text{гр}}$ используется датчик GY-521, построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и ускорения по трем осям [24], установленный на крюке подъемного механизма (около груза). Сигнал ϕ рассчитывается интегрированием измеренной производной $\dot{\phi}$. Определение переменной x осуществляется по энкодеру, установленному на тележку, а \dot{x} — пропусканием сигнала x через реальное дифференцирующее звено с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 0,01 [с]. В соответствии с этим шум измерения переменных $\dot{\phi}$, $\dot{x}_{\text{гр}}$ и x считались гауссовскими центрированными, со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 [град/с]; 0,1 [м/с²]; 0,1·10⁻³ [м].

Параметры эталона (4): $\xi_m = 0,9$; считаем, что ω_m удовлетворяет (13) при точной оценке l , поэтому $\omega_m = 1,28$ [с⁻¹]; $x_{\text{гр}}^{\text{зад}} = 1$ [м]. Параметры алгоритма идентификации (8): $\Delta t = 0,01$ [с]; $\theta = 10$; $\beta = 0,99$. Закон управления (10) вычислялся дискретно с тем же временным шагом. Управление фильтруется на аperiodическом звене с постоянной времени 0,05 [с], моделирующем привод. Также была сформирована задержка 0,01 [с] при подаче управления на объект. Смоделировано воздействие ветра на подвешенный груз, начинающееся в момент времени 7,5 [с] и имеющее ступенчатый вид с размахом, пропорциональным массе груза. Исследование проводили в среде MATLAB.

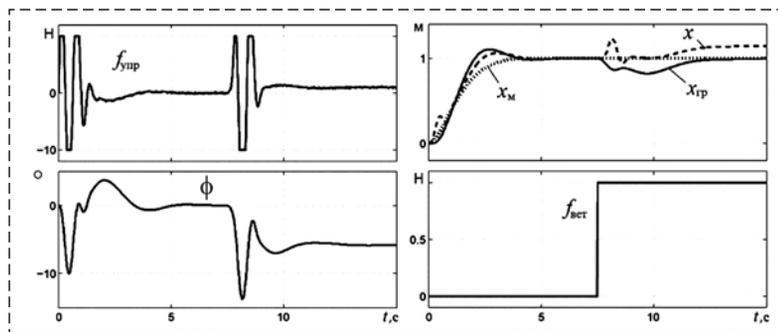


Рис. 2. Переходный процесс системы управления при $m_2 = 1$ кг, $J = 0,008$ кг·м²
 Fig. 2. The transition process of control system with $m_2 = 1$ kg, $J = 0,008$ kg·m²

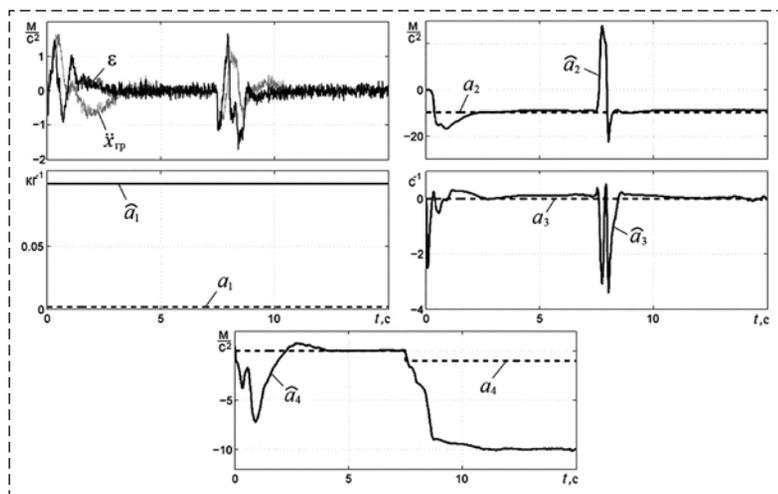


Рис. 3. Текущая идентификация в системе управления при $m_2 = 1$ кг, $J = 0,008$ кг·м²
 Fig. 3. Continuous identification in the control system at $m_2 = 1$ kg, $J = 0,008$ kg·m²

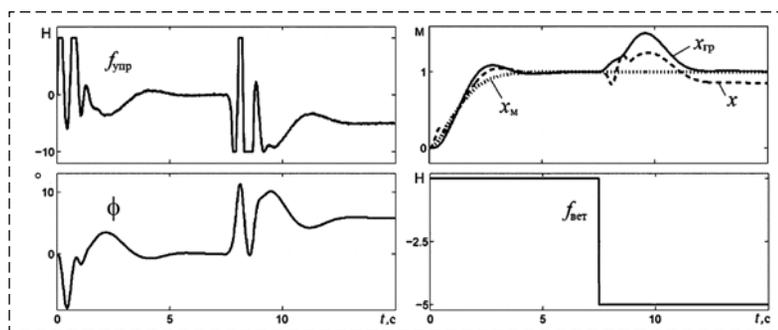


Рис. 4. Переходный процесс системы управления при $m_2 = 5$ кг, $J = 0,02$ кг·м²
 Fig. 4. The transition process of control system with $m_2 = 5$ kg, $J = 0,02$ kg·m²

На рис. 2—4 приведены результаты исследования системы управления при различных параметрах объекта.

В результате предварительных исследований системы управления и на основании соотношений (11), (12) и (14) экспериментально была определена величина $\hat{a}_1 \equiv |\hat{a}_1|_{\max} = 0,1$ [кг⁻¹] — намного больше истинного значения (см. рис. 3), она мало зависит от изменения параметров объекта управления.

Рис. 2 соответствует следующим параметрам: $m_2 = 1$ [кг], $J = 0,008$ [кг·м²], при этом рис. 3 отображает процесс текущей идентификации в этом исследовании. На рис. 4 представлены переходные процессы при параметрах груза: $m_2 = 5$ [кг], $J = 0,02$ [кг·м²].

Хотя текущие оценки параметров далеки от истины, невязка идентификации близка к нулю, и траектория перемещения груза близка к эталонной, внешнее возмущение парируется. Подобным образом были проведены исследования разработанной системы управления макетом мостового крана в широком диапазоне типовых вариантов переносимого груза ($l = l_{\max} = 1,5$ [м]), указанных в таблице.



Рис. 5. Время регулирования линейного перемещения груза по вариантам груза
 Fig. 5. Time of regulation of linear movement of load by variants

Варианты груза
 The options of load

№	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза	№	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза
1	$m_2 = 0,01$ [кг], $J = 0,00004$ [кг·м ²]	Полнотелый шар с радиусом 0,1 [м]	7	$m_2 = 2$ [кг]; $J = 0,018$ [кг·м ²]	Контейнер 0,303 [м] × 0,122 [м] × 0,129 [м]
2	$m_2 = 0,1$ [кг], $J = 0,0004$ [кг·м ²]		8	$m_2 = 5$ [кг]; $J = 0,045$ [кг·м ²]	
3	$m_2 = 1$ [кг], $J = 0,004$ [кг·м ²]		9	$m_2 = 8$ [кг]; $J = 0,0723$ [кг·м ²]	
4	$m_2 = 4$ [кг], $J = 0,016$ [кг·м ²]		10	$m_2 = 1$ [кг]; $J = 0,0076$ [кг·м ²]	Труба длиной 0,3 [м] и радиусами 0,0125 [м], 0,0123 [м]
5	$m_2 = 8$ [кг], $J = 0,032$ [кг·м ²]		11	$m_2 = 4$ [кг]; $J = 0,0303$ [кг·м ²]	
6	$m_2 = 0,01$ [кг]; $J = 0,00009$ [кг·м ²]		12	$m_2 = 8$ [кг]; $J = 0,0606$ [кг·м ²]	
		Контейнер 0,303 [м] × 0,122 [м] × 0,129 [м]			

Оценивалось время регулирования — интервал времени, за который груз достигает заданного положения с точностью не хуже $\pm 5\%$ от заданного. Зависимость этого времени от параметров груза по таблице представлена на рис. 5. Время регулирования не превышает 3,5 с. Этому же времени соответствует успокоение угловых колебаний груза до амплитуды $0,5^\circ$. Подобные результаты без смены параметров системы управления были получены и при других параметрах крана и возмущениях.

Заключение

Представленный метод управления мостовым краном и результаты исследования указывают на высокую эффективность построения системы управления по предложенному подходу. В конкретных условиях система требует минимальной предварительной настройки, связанной с выбором параметров алгоритма (8), возможного уточнения (13), определения оценки \hat{a}_1 в соответствии с соотношениями (11), (12), (14) и, наконец, с выбором длины подвеса, соответствующей целевой точке доставки груза. При работе в условиях текущей неопределенности система управления быстро подстраивается под реальные характеристики объекта управления и внешних неконтролируемых возмущений, гасит колебания груза, обеспечивает высокую точность позиционирования груза в заданном положении. Систему управления можно построить на доступном недорогом оборудовании. Предлагаемый метод может являться основой для создания реальных систем управления кранам любых типов, работающих с подвешенным грузом.

Список литературы

1. 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.
2. Толочко О. И., Бажутин Д. В. Гашение колебаний перемещаемых мостовыми кранами грузов при переменной длине каната // Завалишинские чтения. Санкт-Петербург. 2016. С. 250—255.
3. Щербаков В. С., Корытов М. С., Шершнева Е. О. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 6. С. 368—374.
4. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, SoonGeul Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13, N. 4. P. 501—507.
5. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
6. Мещеряков В. Н., Колмыков В. В. Способы определения параметров грузов, перемещаемых мостовыми кранами

с системой автоматического успокоения колебаний // Фундаментальные исследования. 2015. № 7. С. 79—84.

7. Инструкция по эксплуатации DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Siemens AG. 2002. 363 с.

8. Петренко Ю. Н., Алави С. Э., Александровский С. В. Исследование работы крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. № 3. С. 20—25.

9. Ухоботов В. И., Величко В. С. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечеткого алгоритма управления // Вестник ЮУрГУ. 2014. Т. 14, № 2. С. 18—23.

10. Orbisaglia M., Orlando G., Longhi S. A comparative analysis of sliding mode controllers for overhead cranes // 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre. Ajaccio. France. 2008. P. 670—675.

11. Ngo Q. H., Nguyen N. P., Nguyen C. N., Tran T. H., Hong K. S. Fuzzy sliding mode control of container cranes // International Journal of Control, Automation and Systems. 2015. Vol. 13, N. 2. P. 419—425.

12. Chen Z. M., Meng W. J., Zhang J. G. Intelligent anti-swing control for bridge crane // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19, N. 10. P. 2774—2781.

13. Ma B., Fang Y., Zhang X. Adaptive tracking control for an overhead crane system // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea. 2008. P. 12194—12199.

14. Fang Y., Ma B., Wang P., Zhang X. A Motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system // IEEE Transactions on control systems technology. 2012. Vol. 20, N. 1. P. 241—248.

15. N. Sun, Y. Fang, H. Chen. Adaptive anti-swing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties // Nonlinear Dyn. 81. 2015. P. 41—51.

16. Boustany F., d'Andrea-Novel B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. 1992. P. 1963—1968.

17. Круглов С. П., Ковыршин С. В., Ведерников И. Е. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4. С. 114—122.

18. Круглов С. П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. Монография: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbuckten, Deutschland. 2012. 125 с.

19. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. Учеб. пособие для вузов. Лань, Санкт-Петербург, 2015. 624 с.

20. 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.

21. Круглов С. П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией // "Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами": электрон. науч. журн. 2019. № 1. С. 27—40. URL: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный (дата обращения: 18.02.2020).

22. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, Механика. 1979. Т. 1. 520 с.

23. Аксаментов Д. Н., Круглов С. П., Ковыршин С. В. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 288—292.

24. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013. 54 p. URL: <http://www.invensense.com>.

A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with Direct Tracking of the Load Movement

S. P. Kruglov, kruglov_s_p@mail.ru, D. N. Aksamentov, Gaastra104@mail.ru, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Corresponding author: Kruglov S. P., Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Accepted on August 14, 2020

Abstract

The paper proposes a method of automated control of an overhead crane aimed at direct tracking of horizontal movement of the load at a set height to the designated position under the conditions of continuous a priori uncertainty of the load parameters and external disturbances. The latter include wind effects, friction changes in the crane trolley movement, etc. The approach replaces two conventional problems: tracking of the crane trolley movement to a set position and damping of angular oscillations of the load. In addition, the proposed control method is based on an adaptive control approach with an identifier and an implicit reference model using "simplified" adaptation conditions. The latter are reduced to the requirement of convergence of the identification residual at applying an algorithm for continuous identification and the selection in a certain range of constant evaluation of the control coefficient. The said evaluation is chosen sufficiently large in its absolute value to provide the largest margin of stability of the closed control system in amplitude with the required quality of control. In order to implement continuous parametric identification, it is proposed to apply recursive least squares method with a forgetting factor. The reference model is chosen in the form of an oscillatory link with an eigenfrequency not exceeding that of a controlled object with a fixed base and falling within an experimentally set range. For closer definition of the reference eigenfrequency, an evaluation of the load suspension length with an accuracy of at least 30 % is required. The simplest algorithm for obtaining such an estimate is proposed. It is based on the average velocity of the vertical movement of the load, which is generally approximately known. The paper proposes a simple algorithm for obtaining such an evaluation and provides the results of model studies of the efficiency of the proposed adaptive control system on the basis of the performance of the developed experimental overhead crane unit, taking into account the characteristics of standard data sensors and drives. The proposed method has demonstrated its high efficiency in a wide range of loads and disturbance conditions. It can serve as a basis for development of functional control systems for any type of cranes for moving suspended loads.

Keywords: overhead crane, oscillations damping, current identification algorithm, adaptive control system, control law, reference model

For citation:

Kruglov S. P., Aksamentov D. N. A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with Direct Tracking of the Load Movement, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 682–688.

DOI 10.17587/mau.21.682-688

References

1. Antipov A. S., Krasnova S. A. 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 Russian).
2. Tolochko O. I., Bazhutin D. V. Eliminating the payload swing for overhead cranes under the variation of cable length, *Zavalishensky reading. Saint-Petersburg*, 2016, pp. 250–255 (in Russian).
3. Shherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O. Active method for dampening load fluctuations after stopping the bridge crane, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 368–374 (in Russian).
4. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, SoonGeul Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 501–507.
5. Chernous'ko F. L., Anan'evskij I. M., Reshmin S. A. Control methods of nonlinear mechanical systems. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p. (in Russian).
6. Meshherjakov V. N., Kolmykov V. V. Methods for determining the parameters of loads moved by bridge cranes with automatic vibration calming system, *Fundamental study*, 2015, no. 7, pp. 79–84 (in Russian).
7. Operating instructions. DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Siemens AG, 2002, 363 p.
8. Petrenko Yu. N., Alavi S. E., Aleksandrovskij S. V. Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model, *Energy, Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS*, 2011, no. 3, pp. 20–25 (in Russian).
9. Uxobotov V. I., Velichko V. S. Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm, *Vestnik YuUrGU*, 2014, 14 (2), pp. 18–23 (in Russian).
10. Orbisaglia M., Orlando G., Longhi S. A comparative analysis of sliding mode controllers for overhead cranes, *16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre, Ajaccio. France*, 2008, pp. 670–675.
11. Ngo Q. H., Nguyen N. P., Nguyen C. N., Tran T. H., Hong K. S. Fuzzy sliding mode control of container cranes, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 419–425.
12. 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, pp. 2774–2781.
13. Ma B., Fang Y., Zhang X. Adaptive tracking control for an overhead crane system, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea*, 2008, pp. 12194–12199.
14. Fang Y., Ma B., Wang P., Zhang X. 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.
15. Sun N., Fang Y., Chen H. Adaptive antiswing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties, *Nonlinear Dyn.*, 2015, vol. 81, pp. 41–51.
16. Boustany F., d'Andrea-Novel B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design, *Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris*, 1992, pp. 1963–1968.
17. Kruglov S. P., Kovy'rshin S. V., Vedernikov I. E. The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm, *Modern technology, System analysis, Modeling*, 2017, no. 4, pp. 114–122 (in Russian).
18. Kruglov S. P. The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a benchmark, Monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken. Deutschland, 2012, 125 p.
19. Pervozvanskij A. A. Automatic control theory course, textbook for universities, Saint-Petersburg, Lan', 2015, 624 p. (in Russian).
20. Ljung L. System Identification: Theory for the User, University of Linköping, Sweden, 1991, 432 p.
21. Kruglov S. P. Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation, *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems, electronic scientific journal*, 2019, no. 1, pp. 27–40 (in Russian), available at: <http://isimm-irgups.ru/toma/12-2019>.
22. Sivuxin D. V. General course of physics, Moscow, Science, Mechanics, 1979, vol. 1, 520 p. (in Russian).
23. Aksamentov D. N., Kruglov S. P., Kovy'rshin S. V. Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms, *Transport infrastructure of the Siberian region*, 2019, no. 2, pp. 288–292 (in Russian).
24. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p., available at: <http://www.invensense.com>.