

Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Аннотация. Обоснована актуальность задачи по автоматизации управления грузовыми кранами в промышленности и на транспорте. Описывается усовершенствованный макет мостового крана, который ранее был разработан для сравнения существующих и новых алгоритмов управления. Приведена структурная схема установки и принципиальная схема подключения контроллера – одноплатного компьютера Raspberry Pi, датчика измерения угловой скорости и ускорения груза, драйвера шагового двигателя привода тележки. Описывается алгоритм адаптивного управления скоростью перемещения тележки с реализацией достижения заданного положения груза и минимизацией его колебаний. Все это выполняется в условиях текущей априорной неопределенности параметров груза и, возможно, внешних возмущений. Алгоритм управления основан на использовании текущей параметрической идентификации объекта управления и неявной эталонной модели, задающей требуемую динамику перемещения груза в горизонтальной плоскости. Полученный закон управления реализован в контроллере с использованием алгоритмического языка Python. Проведены исследования адаптивного закона управления и представлены результаты в виде графиков переходных процессов с различными параметрами крана – различной длине подвески. Результаты исследований подтверждают высокую эффективность предлагаемого алгоритма: в условиях текущей неопределенности, система управления быстро подстраивается под реальные характеристики объекта управления и гасит колебания груза, которые возникают при ускорении и торможении тележки, что обеспечивает высокую точность позиционирования груза в заданном положении и за короткий промежуток времени.

Ключевые слова: экспериментальная установка, алгоритм адаптивного управления, текущая идентификация параметров, макет мостового крана, управление по скорости, параметры крана

D.N. Aksamentov, S.P. Kruglov, S.V. Kovyrshin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

RESEARCH OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF CRANE SYSTEMS ON THE MODEL OF THE OVERHEAD CRANE

Abstract. The relevance of the task of automating the management of cargo cranes in industry and transport is justified. An improved layout of a bridge crane, which was previously developed to compare existing and new control algorithms, is described. There is a block diagram of the installation and a schematic diagram of the connection of the controller - a single-board Raspberry Pi computer, a sensor for measuring angular speed and cargo acceleration, a driver of the step motor of the trolley drive. What is described is an algorithm for adaptive control of the speed of movement of the trolley with realization of reaching the specified position of the load and minimizing its oscillations. All this is carried out in conditions of current a priori uncertainty of cargo parameters and, possibly, external disturbances. The control algorithm is based on the use of the current parametric identification of the control object and an implicit reference model that specifies the required dynamics of cargo movement in the horizontal plane. The resulting control law is implemented in a controller using the algorithmic Python language. Studies of adaptive control law were carried out and results are presented in the form of transient flow charts with different crane parameters - different suspension length. The results of research confirm the high efficiency of the proposed algorithm: in the current uncertainty, the control system quickly adjusts to the real characteristics of the control object and extinguishes the cargo fluctuations that occur during acceleration and braking of the trolley, which provides high accuracy of positioning the load in a given position and in a short period of time.

Keywords: experimental installation, adaptive control algorithm, current parameter identification, bridge crane layout, speed control, crane parameters

Введение

В современном мире мостовые краны широко используются в различных сферах промышленности, цехах, строительных площадках, складах, железнодорожных тупиках, морских портах и так далее, для перемещения тяжёлых и габаритных грузов. Данные грузоподъёмные механизмы являются сложными объектами управления ввиду конструктивных особенностей и эксплуатационных условий. Во время работы мостовых кранов нередко возникают сложности управления из-за раскачивания транспортируемого груза. Этот фактор возникает у всех крановых систем с гибким подвесом и отрицательно влияет на работу крана в целом: усложняет установку груза в необходимое место, возникает необходимость в дополнительной строповке; увеличивает нагрузку на механизмы крана, повышается износ конструкции; снижается производительность, безопасность и усложняет работу оператора крана. Решение проблемы маятниковых качений во время переноса груза позволит сократить до 20% времени погрузочно-разгрузочных работ [1].

Актуальность развития данного направления подтверждает большое количество работ посвящённых разработке систем управления крановыми системами с возможностью демпфировать маятниковые колебания груза. В настоящее время существует три основных способа снижения колебаний груза [2-9]: использование механизмов ручного управления; частичной модернизации конструкции крана, применение дополнительных направляющих или подвесок; использование автоматизированных систем управления краном. Первый способ подразумевает высокую квалификацию крановщика, также связан с его физической и эмоциональной усталостью, отсюда возникает вероятность ошибки оператора крана. Второй способ требует изменения отдельных механизмов крана, что зачастую влечёт большие трудности в плане реализации и больших материальных затрат. Наиболее распространённое решение является автоматическое управление краном.

Перспективным направлением в развитии грузоподъёмного кранов является разработка автоматизированных систем управления, позволяющих устранять маятниковые колебания груза, парировать внешние возмущения, например, воздействия ветра, и точно перемещать груз в пункт назначения.

При разработке и исследовании новых систем управления необходимо проводить практические испытания. Однако на промышленных предприятиях возникает сложность в выводе кранов из эксплуатации для исследования алгоритмов управления, так как опытные испытания могут занимать большие промежутки времени.

Для возможности сравнения качества существующих и новых разрабатываемых алгоритмов управления, в одинаковых условиях эксплуатации крана и предварительной настройки каждой анализируемой системы управления в целях достижения наилучших её характеристик, ранее была разработана экспериментальная установка мостового крана [10].

Макет мостового крана

Макет мостового крана [10] представляет из себя испытательную установку для исследования законов управления тележкой мостового крана по одной оси движения. Структурная схема макета представлена на рис. 1.

На рисунке используются следующие обозначения: 1 – персональный компьютер; 2 – сеть Ethernet для подключений персонального компьютера к управляющему контроллеру; 3 – контроллер Raspberry Pi; 4 – тележка крана; 5 – перемещаемый груз; 6 – основная конструкция макета мостового крана; к тележке закреплён груз с помощью гибкой подвески длиной l , φ – угол отклонения троса от вертикальной оси; x – расстояние, пройденное тележкой; $x_{гр}$ – расстояние, на которое переместили груз.

Для измерения угла отклонения троса от вертикальной оси используется датчик GY-521 [11], построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050. С его помощью производится измерение ускорения и угловой скорости по трём осям. Расстояние,

пройденное тележкой крана x определяется программным способом, так как используется шаговый двигатель NEMA 17 в качестве приводного элемента.

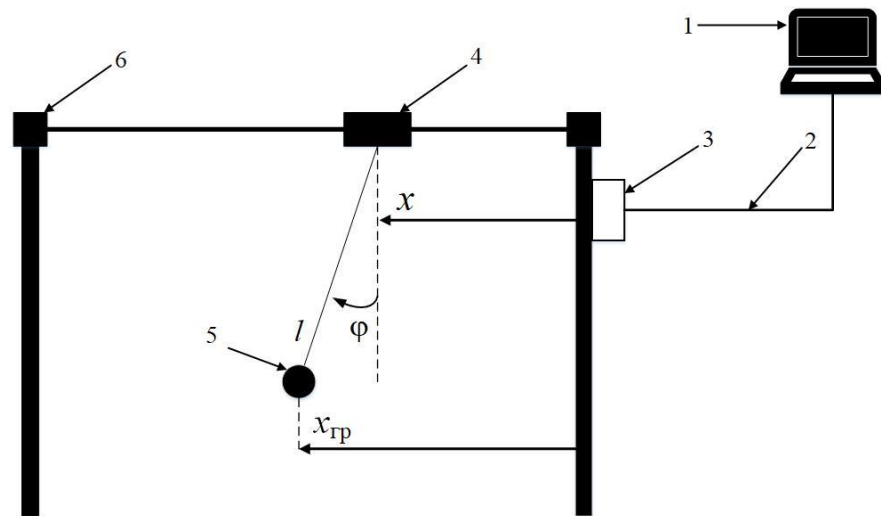


Рис. 1. Структурная схема макета мостового крана

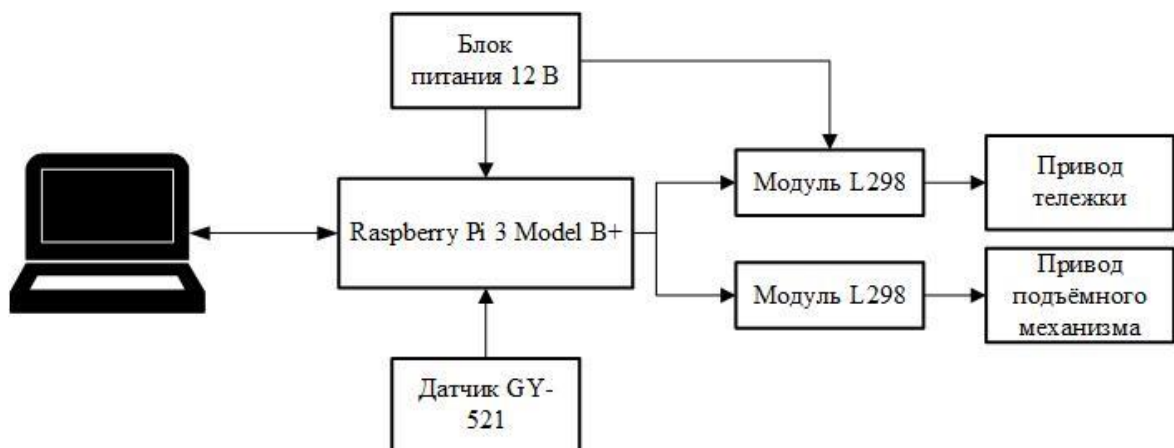


Рис. 2. Принципиальная схема подключения макета мостового крана

Принципиальная схема подключения макета мостового крана изображена на рис. 2. На ней показаны все основные компоненты системы управления. Одноплатный компьютер Raspberry Pi осуществляет сбор данных с датчика угловой скорости GY-521 и принимает команды оператора. Далее, контроллер обрабатывает полученную информацию и в текущий момент времени формирует управляющие сигналы на драйверы L298N, которые в свою очередь управляют двигателем постоянного тока (подъемного механизма) и шаговым двигателем (приводом тележки). Тем самым, система управления обрабатывает данные с прибора обратной связи в текущий момент времени и подстраивает управляющие сигналы.

Описание закона управления

В настоящей работе проводится исследования ранее разработанной системы адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием за перемещением груза [12] на экспериментальной установке.

Схема движения тележки крана и перемещение груза представлена на рис. 3.

При описании объекта управления приняли, что управляющее воздействие на тележку является сила привода, тогда 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 [13]:

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

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

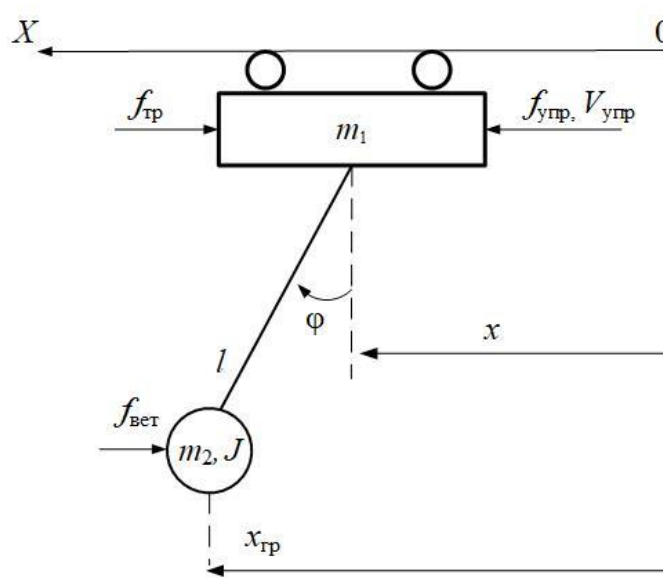


Рис. 3. Схема перемещения груза по одной оси

В связи с малым углом отклонения груза, менее 30 градусов, небольшой скоростью перемещения и физику движения, приняли следующие упрощения: $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \approx 0$. С учётом этих упрощений система (1) переписывается относительно переменных x , φ и $x_{\text{гр}}$ в виде [14]:

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

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

Далее из последнего равенства системы (2), на основании первых двух, получается уравнение динамики перемещения груза, которое будем считать объектом управления [12]:

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

где $a_1 \triangleq a_{x1} + l a_{\varphi 1}$; $a_2 \triangleq a_{x2} + l a_{\varphi 2}$; $a_3 \triangleq a_{x3} + l a_{\varphi 3}$; $a_4 \triangleq a_{x4} + l a_{\varphi 4}$.

Поскольку на установке в качестве привода тележки используется шаговый двигатель, в качестве управляющего сигнала выберем не силу, а скорость тележки. 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 $(a_3 - a_1 a_{x3}/a_{x1}) = 0$:

$$\ddot{x}_p \approx a_1^V V + a_2^V \varphi + a_3^V. \quad (4)$$

где $a_1^V = a_1/a_{x1} = J/(J + m_2 l^2)$, $1 \geq a_1^V > 0$; $a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2}/a_{x1})$; $a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4}/a_{x1})$, $V_{\text{упр}} = V = \dot{x}$ – скорость перемещения тележки, она же – управляющий сигнал.

Для поиска в текущем времени оценок параметров (a_2^V, a_3^V) применяется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [15]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1}] / \beta; \\ P_0 = \vartheta E_3; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (5)$$

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 символ « $\hat{\cdot}$ » означает оценку, а индекс « t » – транспонирование; $y_i \triangleq [\varphi_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i – невязка идентификации; z_i – отклик объекта, в нашем случае это $(\ddot{x}_p - \hat{a}_1^V V)_i$ – оценка $\hat{a}_1^V$ будет назначаться в виде константы, в силу допустимости большого диапазона, в котором она может находиться [12]; P_i – матричный (2×2) коэффициент усиления алгоритма; β – назначаемый фактор забывания алгоритма идентификации искомых параметров; ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; E_2 – единичная матрица (2×2) .

Закон управления системы «тележка-маятник» с учётом оцениваемых параметров имеет вид:

$$\ddot{x}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -a_{m1}^{-1} [a_{m0} (\ddot{x}_{\text{гр}} - \ddot{x}_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \varphi - \hat{a}_3^V]. \quad (6)$$

где $a_{m1} \triangleq -2\xi_m \omega_m$; $a_{m0} \triangleq -(\omega_m)^2$; ξ_m, ω_m – эталонные значения относительного коэффициента затухания и собственной частоты назначаемой эталонной модели соответственно [12].

Результаты исследования

Основные параметры экспериментальной установки [10]: $m_1 = 1,5 \text{ кг}$; $m_2 = 0,85 \text{ кг}$; $J = 0,002 \text{ кг м}^2$; длина троса $l = 0,65 \text{ м}$ и $l = 0,4 \text{ м}$. Параметры трения для перемещения тележки не анализировались, но они явно присутствуют. На установке для измерения переменных ϕ и $x_{\text{гр}}$ используется MEMS гироскоп-акселерометр (GY-521), установленный возле места крепления груза к тросу. Сигнал ϕ – определялся интегрированием измеренного $\dot{\phi}$ по данным GY-521. Переменная x определяется программно, по количеству управляющих импульсов, которые подаются на шаговый двигатель привода тележки.

Параметры алгоритма управления: $\xi_m = 0,993$; $\omega_m = 1,92 \text{ с}^{-1}$; $x_{\text{гр}}^{\text{зад}} = 0,5 \text{ м}$; $d_1^V = 0,0334$ (в 3-6 раз больше истинного значения).

Программная реализация алгоритма управления экспериментальной установки и обработки данных с датчика GY-521 была написана на языке программирования Python.

На рис. 4 изображён переходный процесс при $l = 0,65 \text{ м}$.

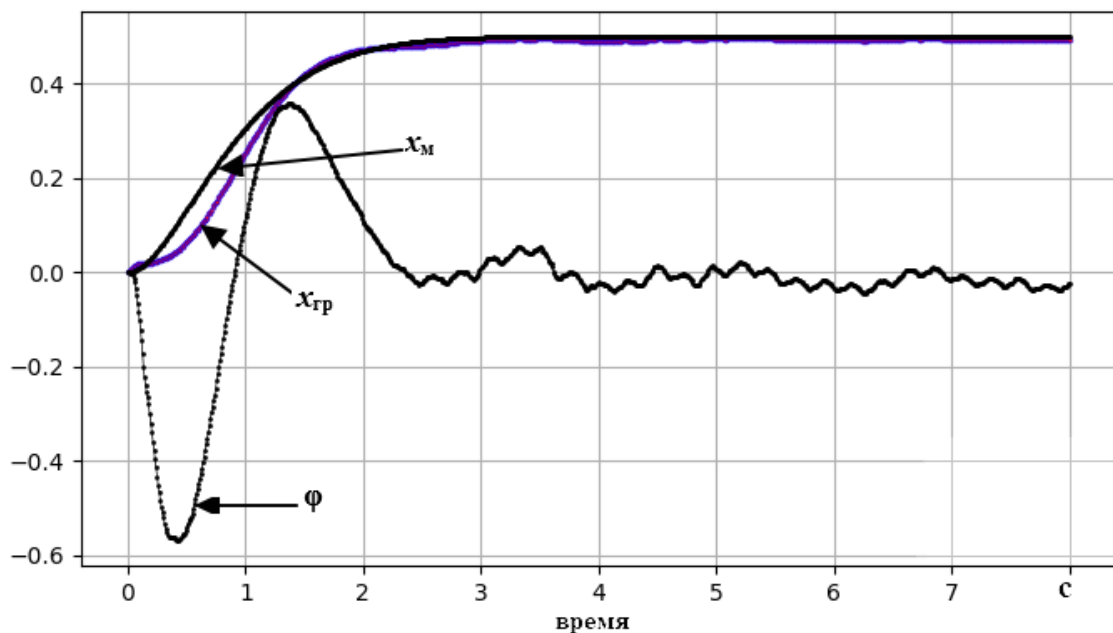


Рис. 4. Переходный процесс системы управления при $l = 0,65 \text{ м}$.

На рис. 5 изображён переходный процесс при $l = 0,4 \text{ м}$.

На рис. 4 и рис. 5 приведены графики зависимостей от времени линейного перемещения груза $x_{\text{гр}}$ в метрах, положение эталонной модели x_m в метрах и угла отклонения ϕ в градусах (на графиках – действительное значение угла разделено на 10, т.е. значению 0.4 по графику реально соответствует 4 градуса).

Можно наблюдать, что при изменении длины подвеса качество переходного процесса практически не меняется. Время регулирования не более 2,5с. Колебание груза после переходного процесса сразу же гасится (налицо только один период колебания груза). Подобные результаты получены и при других параметрах крана и груза.

Заключение

Произведенные исследования алгоритма адаптивного управления с прямым отслеживанием за перемещением груза и управления по скорости перемещения тележки

подтверждают высокую эффективность данной системы управления. В представленном исследовании система требует минимальной предварительной настройки, связанной с выбором коэффициентов алгоритма идентификации и параметра d_1^v . При работе в условиях текущей неопределенности система управления быстро подстраивается под реальные характеристики объекта управления, гасит колебания груза, которые возникают при ускорении и торможении тележки, что обеспечивает высокую точность позиционирования груза в заданном положении.

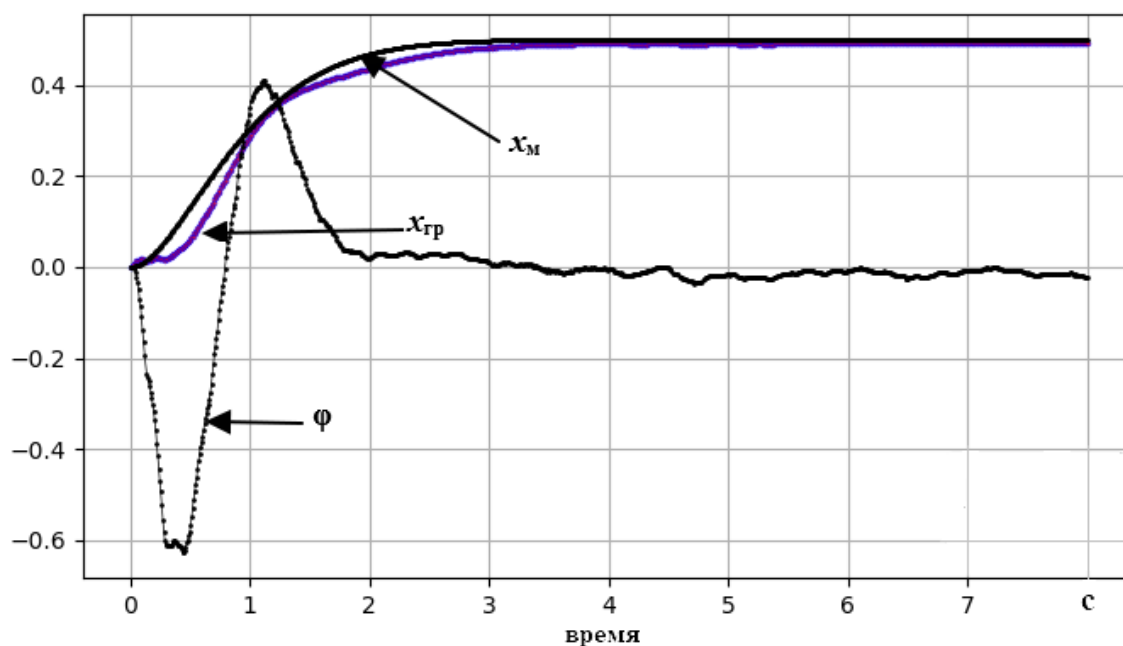


Рис. 5. Переходный процесс системы управления при $l = 0,4 \text{ м}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щедринов А.В., Сериков С.А., Колмыков. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. №8. С. 13-17.
2. SIMOCRANE sway control systems (2015), [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/mechanical-engineering/cranesolutions/simocrane/sway-control-system/pages/sway-control-systems-simocrane.aspx> (дата обращения: 06.05.2015)
3. 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.
4. Аглямов А.Р. Современные тенденции развития углеобогащения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 1 – С. 150-152.
5. Герасимьяк Р.П., Лещёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем – Одесса : СМІЛ, 2008. - 192 с.
6. Теличко Л.Я., Дорофеев А.А. Система управления электроприводами, обеспечивающая бесперекусное передвижение мостовых кранов / Л.Я. Теличко // Вестник

Воронежского государственного технического университета - Воронеж, 2012. - № 3 – С. 113–116.

7. Смахов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смахов, Н.И. Ерофеев. – М.: машиностроение, 1975. – 239 с.

8. Кобытов М.С., Щербатов В.С., Титенко В.В. Аналитическое решение задачи разгона груза мостовым краном с постоянным ускорением при гашении колебаний грузового каната // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Том 5, № 4. С. 132-136.

9. Рогова Н.С., Юркевич В.Д. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // Сборник научных трудов НГТУ № 3. 2015. С. 43-54.

10. 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.

11. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О., Трубин В.Г., Трубин М.В. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. № 3(25), 2018. С. 9-22.

12. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682-688.

13. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.

14. 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.

15. 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.

REFERENCES

1. Shhedrinov A.V., Serikov S.A., Kolmykov V.V. Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruzha dlja mostovogo kрана [Automatic Load Vibration Damping System for Overhead Crane]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2007, No8, pp. 13-17.

2. SIMOCRANE sway control systems (2015). URL: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/mechanical-engineering/cranesolutions/simocrane/sway-control-system/pages/sway-control-systems-simocrane.aspx>.

3. 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.

4. Agljamov A.R. Sovremennye tendencii razvitiya ugleobogashhenija [Current trends in the development of coal enrichment] *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2014, No1, pp. 150-152.

5. Gerasimjak, R.P., Leshhev, V.A. Analiz i sintez kranovyh jelektromehanicheskikh system [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems], Odessa, SMIL, 2008. 192 p.

6. Telichko L.Ja., Dorofeev A.A. Sistema upravlenija jelektroprivodami, obespechivajushhaja besperekosnoe peredvizhenie mostovyh kranov [Electric drive control system that ensures the smooth movement of overhead cranes], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], Voronezh, 2012, No3 pp. 113-116.
7. Smehov A.A., Erofeev N.I. Optimal'noe upravlenie pod'emno-transportnymi mashinami [Optimal control of lifting and transport machines], Moscow, Mashinostroenie, 1975, 239 p.
8. Korytov M.S., Shherbakov V.S., Titenko V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi razgona gruza mostovym kranom s postojannym uskorenijem pri gashenii kolebanij gruzovogo kanata [Analytical solution of the problem of cargo acceleration by a bridge crane with constant acceleration while damping the vibrations of the cargo rope, *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2017, Vol. 5, No4. pp. 132-136.
9. Rogova N.S., Jurkevich V.D. Razrabotka algoritmov upravlenija dlja peremeshhenija gruzov portal'nym kranom [Development of control algorithms for moving cargo by gantry crane]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU* [Collection of scientific works of NSTU], No3, 2015, pp. 43-54.
10. Aksamentov D.N., Kruglov S.P., Kovyreshin S.V. Ustanovka po issledovaniju algoritmov uspokoenija kolebanij gruzov mostovogo krana [Installation for the study of algorithms for calming the vibrations of the load of the bridge crane] *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, Vol. 2, pp. 288-292.
11. Zhmud' V.A., Kuznecov K.A., Kondrat'ev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V. Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkljuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike [MPU6050 accelerometer and gyroscope: first turn on on the STM32 and study the readings in static] *Avtomatika i programmaja inzhenerija* [Automation and software engineering], No3(25), 2018, pp. 9-22.
12. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. Metod adaptivnogo upravlenija mostovym kranom s prjamym otslezhivaniem peremeshhenija gruzov [A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with Direct Tracking of the Load Movement] *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, No21(12), pp. 682-688.
13. Chernous'ko F.L., Anan'evskij I.M., Reshmin S.A. Metody upravlenija nelinejnymi mehanicheskimi sistemami [Methods of control of nonlinear mechanical systems]. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p.
14. Kruglov S.P., Kovyreshin S.V., Vedernikov I.E. Adaptivnoe upravlenie peremeshheniem gruzov mostovym kranom s identifikacionnym algoritmom [Adaptive control of cargo movement by overhead crane with identification algorithm] *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017, No4, p. 114-122.
15. Ljung L. System Identification: Theory for the User, University of Linkoping. Sweden. 1991. 432 p.

Информация об авторах

Аксаментов Дмитрий Николаевич – аспирант «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Круглов Сергей Петрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Ковыршин Сергей Владимирович – к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkow@mail.ru

Authors

Aksamentov Dmitriy Nikolaevich – postgraduate of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Gaastra104@mail.ru.

Kruglov Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru.

Kovyrshin Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkow@mail.ru.111

Для цитирования

Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивной системы управления мостового крана на экспериментальной установке [Электронный ресурс] / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — № . 1 — Режим доступа: <https://mnv.igups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 07.06.2021).

For citation

Aksamentov D.N., Kruglov S.P., Kovyrshin S.V. *Issledovanie adaptivnoj sistemy upravleniya mostovogo krana na eksperimental'noj ustanovke* [Research of adaptive control system of crane systems on the model of the overhead crane]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no.1 . [Accessed 07.06.21]