

В. С. Ловейкин¹, Ю. А. Ромасевич¹,
А. С. Хорошун², А. Г. Шевчук¹

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИИ
ДВИЖЕНИЕМ ПОДВИЖНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МАЯТНИКА. ЧАСТЬ 2

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
ул. Героев обороны, 12 в, Киев, Украина; e-mail: romasevichyuriy@ukr.net

²Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины,
ул. Петра Нестерова, 3, Киев, Украина; e-mail: center@inmech.kiev.ua

Abstract: A numerical simulation of dynamics of the movable pendulum (a crane with a payload on a flexible suspender) is carried out, when the obtained in the Part 1 of this publication optimal controls being realized by means of frequency-controlled drive. The simulation results showed the sufficient for practical applicability quality of optimal controls implementation, when even the external stochastic perturbations (wind rush) act on the system movement. A comparative analysis of simulation results is shown that the modified constraints allow to reduce a few times the dynamic forces in a crane construction. In this case the duration of the system movement must be slightly increased. The results of experimental studies of control in the laboratory conditions allowed to identify the causes for deviation of the crane actual speed from the optimal one and to suggest the methods for its elimination.

Key words: simulation, experimental investigation, time-optimal control, payload oscillation, dynamic loads, gantry crane.

Введение.

Прикладная ценность задач оптимального быстрогодействия перемещения математического маятника с подвижной точкой подвеса заключается в том, что полученные результаты востребованы для синтеза алгоритмов управления грузоподъемными кранами, которые транспортируют груз на гибком подвесе (мостовые и козловые краны). Действительно, движение указанных грузоподъемных машин достаточно адекватно описывается уравнениями подвижного математического маятника и, поэтому, в последующем изложении исследование оптимального управления движением математического маятника с подвижной точкой подвеса будем проводить на примере грузоподъемного крана с грузом на гибком подвесе.

Общий подход в исследованиях практической реализации оптимальных по быстродействию управлений указанных выше систем заключается в компьютерном моделировании и анализе полученных результатов [1, 7, 8, 10, 14 – 16] с последующим проведением экспериментов в лабораторных [7, 9, 12] или производственных условиях [2].

Отметим, что развитие средств микропроцессорной техники и регулируемых приводных механизмов [3] позволяет повысить качество управления движением крановыми механизмами и создает предпосылки для эффективной реализации оптимальных управлений на практике.

Настоящая работа представляет собой вторую часть исследования задач оптимального быстрогодействия подвижного математического маятника (крана с грузом на гибком подвесе). В частности, в текущей работе главный акцент сделан на возможности практической реализации оптимальных управлений движением крана и определении преимуществ и недостатков оптимальных управлений с классическими и модифицированными ограничениями на управление.

Для проведения исследований использованы как теоретические, так и экспериментальные методы.

§1. Моделирование оптимального управления движением грузоподъемного крана с грузом на гибком подвесе.

Реализация оптимальных управлений движением крана с грузом на гибком подвесе, который моделируется как подвижный математический маятник, на практике, как правило, возлагается на управляемый асинхронный электропривод крана [4]. Широкое распространение для этой цели получили частотные преобразователи, которые путем изменения частоты и напряжения питания двигателя позволяют изменять его угловую скорость и электромагнитный момент [6]. Для моделирования изменения электромагнитного момента двигателя используем уравнения обобщенной электрической машины [5]. При этом примем предположение, согласно которому частота напряжения питания электропривода пропорциональна найденным в первой части исследования [13] законам изменения скорости движимой точки подвеса груза (крана или крановой тележки):

$$f = (s_2^{opt} + s_4^{opt} \Omega_0^{-2}) f_n v_{steady}^{-1}, \quad (1.1)$$

где s_2^{opt} и s_4^{opt} – фазовые координаты динамической системы (скорость и рывок груза), которые соответствуют найденным в работе [13] оптимальным законам управления движением маятника; Ω_0 – частота собственных колебаний груза относительно неподвижной точки подвеса, которая определяется так $\Omega_0 = \sqrt{g/l}$; v_{steady} – установившаяся скорость движения точки подвеса груза; f_n – номинальная частота напряжения питания двигателя ($f_n = 50$ Гц).

В дальнейших исследованиях было проведено моделирование динамики оптимального управления движением грузоподъемного крана при помощи скалярного метода управления его электроприводом. При этом амплитуда напряжения питания двигателя изменяется пропорционально частоте (1.1) от некоторого начального значения. Параметры частотно-управляемого привода механизма передвижения крана, которые использованы при моделировании, приведены в таблице 1.1.

Как известно [5], скалярное управление не обеспечивает качественной отработки заданной угловой скорости электродвигателя в динамических режимах. Это может снизить эффективность реализации оптимальных управлений на практике. Поэтому целесообразность скалярного метода управления электроприводом для практической реализации оптимального управления движением крана необходимо обосновать путем анализа результатов моделирования.

Таблица 1.1

Параметр	Значение
Номинальная мощность привода, кВт	2x80
Номинальная скорость вращения двигателей, об/мин	580
Перегрузочная способность двигателей	2,5
Номинальное напряжение питания двигателей, В	380
Начальное напряжение питания электродвигателей, В	38
КПД электропривода	0,92
КПД механических передач привода	0,90
Передаточное число механизма передвижения крана	4,40
Радиус ходовых колес крана, м	0,20

При работе кранов на открытых площадках (морские и речные порты) на движение груза и самого крана значимое влияние могут оказывать ветровые порывы. Для учета указанного фактора при проведении моделирования было исследовано влияние ветрового порыва на качество устранения колебаний груза в момент остановки крана. Таким образом, обобщенная математическая модель электромеханической системы

«частотно-управляемый привода крана – кран – груз на гибком подвесе» при воздействии на груз и кран ветрового порыва представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{1\alpha}}{dt} &= (u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_1 + k_r e_{2\alpha})\delta^{-1}L_1^{-1}; \\
 \frac{di_{1\beta}}{dt} &= (u_{1\beta} - i_{1\beta}R_1 - k_r e_{2\beta})\delta^{-1}L_1^{-1}; \\
 \frac{di_{2\alpha}}{dt} &= -((u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_1)k_s + e_{2\alpha})\delta^{-1}L_2^{-1}; \\
 \frac{di_{2\beta}}{dt} &= -((u_{1\beta} - i_{1\beta}R_1)k_s - e_{2\beta})\delta^{-1}L_2^{-1}; \\
 \frac{ds_j}{dt} &= s_{j+1}; \\
 s_5 &= (3 \cdot 2^{-1} \cdot pL_{12}(i_{1\beta}i_{2\alpha} - i_{1\alpha}i_{2\beta})\eta \cdot \chi \cdot r \cdot m_1^{-1} - W \cdot m_1^{-1}) \cdot \Omega_0^2 - \Omega^2 s_3 + \\
 &+ F_1(S_1, v_1, c) \cdot m_1^{-1} \cdot \Omega_0^2 - \frac{d^2}{dt^2} F_2(S_2, v_2, c) m_2^{-1},
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

где $i_{1\alpha}$ и $i_{1\beta}$ – проекции обобщенного вектора тока статора на неподвижные (связанные со статором двигателя) ортогональные координатные оси α и β ; $i_{2\alpha}$ и $i_{2\beta}$ – проекции обобщенного вектора тока ротора на координатные оси α и β ; L_1 и L_2 – индуктивности статорной и роторной обмоток соответственно; L_{12} – взаимоиндуктивность; k_r и k_s – коэффициенты магнитной связи ротора и статора соответственно; p – количество пар полюсов электродвигателя; $u_{1\alpha}$ и $u_{1\beta}$ – проекции обобщенного вектора напряжения статора на координатные оси α и β ; $e_{2\beta}$ и $e_{2\alpha}$ – ЭДС, которые индуцированы потокосцеплениями ротора по осям α и β соответственно; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; R_2 – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора; X_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора; X_2 – приведенное к статору индуктивное сопротивление обмотки ротора; δ – коэффициент рассеяния; r – радиус колеса крана; χ – передаточное число привода крана; F_1 и F_2 – силы, действующие на кран и груз соответственно, которые вызваны ветровым порывом; S_1 и S_2 – самая большая площадь (мидель) поперечного сечения крана и груза соответственно (для принятого в расчетах портового перегружателя $S_1 = 22,4 \text{ м}^2$, для 40-футового контейнера $S_2 = 31,5 \text{ м}^2$); c – коэффициент, учитывающий факторы: затенения от рядом стоящих сооружений и конструкций, плотность воздуха и другие постоянные факторы; v_1 и v_2 – скорости движения воздуха относительно подвижного крана и груза соответственно (в расчетах принято, что скорость движения воздуха описывается случайной функцией с максимальным значением равным 9,5 м/с, что соответствует 5 баллам по шкале Бофорта. Кроме того, принято, что ветровой порыв начинается на пятой секунде движения крана, а заканчивается на восьмой).

Отметим, что именно электрический привод вносит нелинейность в модель (1.2). Подобная закономерность присутствует и в других задачах управления [11, 14] движением систем с электроприводом.

Структура расчетов, которые были выполнены при моделировании оптимальных управлений движением крана, приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что исследование эволюции системы во времени производилось последовательным численным интегрированием системы уравнений (1.2) на разных этапах движения. При этом конечные условия текущего этапа были начальными для последующего. Начальные условия движения системы на первом этапе были выбраны нулевыми: в расчетах исследован случай движения системы из состояния покоя.

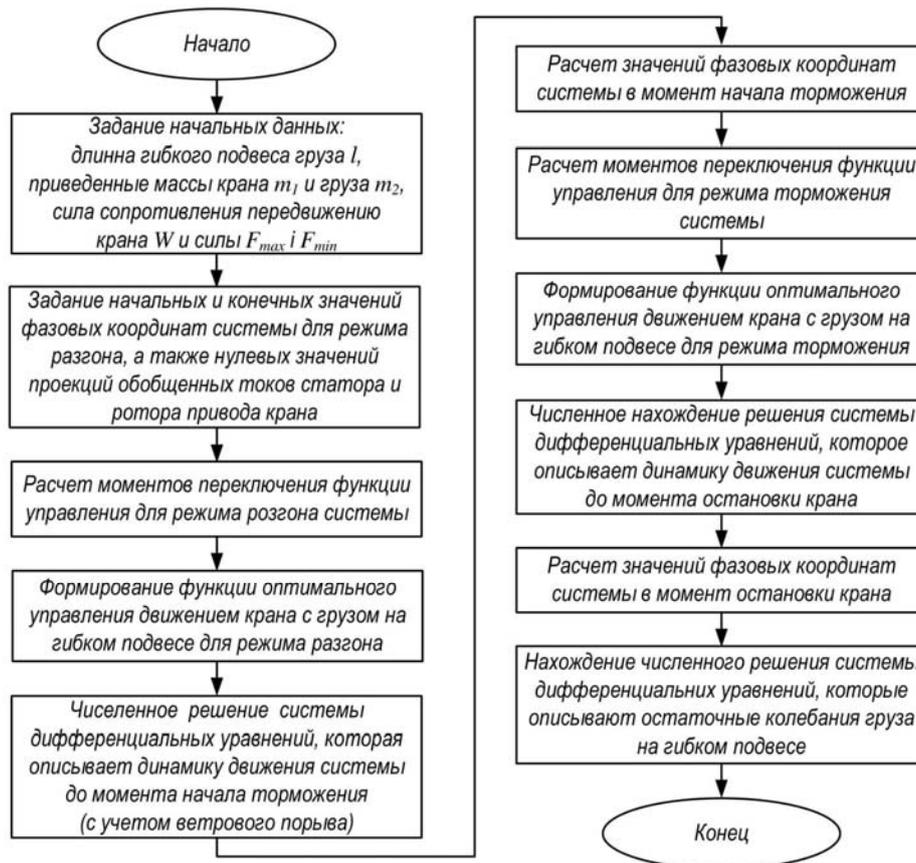


Рис. 1.

§2. Анализ результатов моделирования.

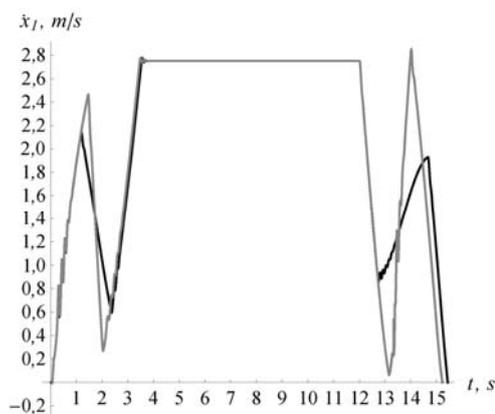


Рис. 2

В результате проведенных расчетов получены графические зависимости, которые описывают: скорости движения крана (рис. 2), отклонения груза на гибком подвесе от вертикали (рис. 3), оптимальные приводные усилия, которые реализованы средствами частотно-управляемого электропривода (рис. 4).

Графики, которые соответствуют оптимальному управлению крана с классическими ограничениями на управление (выражения (2.6) в работе [13]) изображены серым цветом, а с модифицированными ограничениями (выражения (2.7) в работе [13]) – черным.

Для проведения сравнительного анализа результатов моделирования оптимальных управлений передвижением крана с грузом на гибком подвесе в табл. 2.1 записаны основные показатели перегрузочного цикла.

Все показатели получены при использовании параметров портового грейферного перегружателя, которые приведены в табл. 3.1 работы [13]

Анализ данных, которые приведены в табл. 2.1, показывает, что тип ограничений на оптимальные управления имеет незначительное влияние на продолжительность режимов движения системы: модифицированные ограничения приводят к увеличению продолжительности переходных режимов лишь на 3,9%. Однако, этот результат нельзя распространять на краны, которые имеют другие параметры. Переходя к обобщениям и выполняя умозрительные рассуждения, можно записать:

$$\lim_{\substack{u_{\min} \rightarrow -\infty \\ u_{\max} \rightarrow \infty}} (T - t_0) = 0; \quad \lim_{\substack{u_{\min} \rightarrow 0 \\ u_{\max} \rightarrow 0}} (T - t_0) = \infty, \quad (2.1)$$

где t_0 и T – моменты начала и окончания оптимального управляемого режима движения системы; u_{\max} и u_{\min} – соответственно максимальное и минимальное ограничения на управление. Выражения (2.1), очевидно, являются справедливыми для широкого класса динамических систем. Однако, сама функция $T - t_0 = f(u_{\max}, u_{\min})$

аргументов u_{\max} и u_{\min} , которые задаются с учетом возможности практической реализации управления, остается неизвестной. Учитывая практическую важность задач оптимального по быстродействию управления динамическими системами, определение влияния ограничений на управление на быстродействие систем является актуальной научной проблемой, требующей дальнейших теоретических исследований.

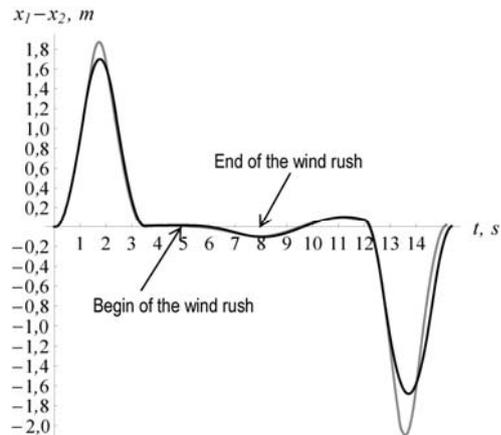


Рис. 3

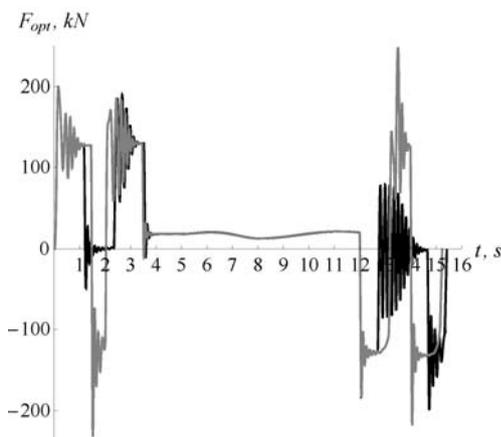


Рис. 4

Таблица 2.1

Наименование показателя	Значение показателя, полученное при ограничениях на управление	
	классических	модифицированных
продолжительность:		
- разгона, с	3,46	3,52
- торможения, с	3,17	3,37
Амплитуда остаточных колебаний груза, град	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$8,55 \cdot 10^{-3}$
Максимальное отклонение груза от вертикали в режиме:		
- разгона, град	10,52	9,68
- торможения, град	12,12	9,77
Среднее значение усилия привода без учета усилий создаваемых свободными токами электродвигателя в режиме:		
- разгона, Н	130000	86420
- торможения, Н	130000	54777

Из рис. 4 видно, что функция оптимального приводного усилия, которое соответствует оптимальному управлению движением крана с грузом, имеет высокочастотную составляющую. Она является результатом свободных токов электропривода механизма передвижения крана. Однако, как видно из рис. 3, действие электромагнитных процессов на колебания груза не значительно, поэтому в подобных задачах ими можно пренебречь.

Переход от классических к модифицированным ограничениям на управление позволяет уменьшить среднее значение усилия привода в 1,50 раза – в режиме разгона и в 2,37 раза – в режиме торможения. Это приводит к снижению динамических нагрузок в механических передачах механизма передвижения крана и в крановой металлоконструкции и повышает долговечность крана.

Ветровой порыв, который учитывается при проведении моделирования, не приводит к колебаниям груза после остановки крана. Данные из табл. 2.1 показывают, что величиной остаточных колебаний груза можно пренебречь. Этот результат получен благодаря учету фактического состояния динамической системы (фазы колебаний груза, скорости и положения крана) в начале режима торможения. Он позволяет обеспечить остановку крана в заданном месте с практически полным устранением колебаний груза на гибком подвесе.

Одним из преимуществ использования модифицированных ограничений на управление является то, что полученное с их использованием оптимальное управление сопровождается уменьшением угла отклонения груза от вертикали: на 8,0% – для разгона и на 19,4% для торможения.

Таким образом, использование модифицированных ограничений на управление по сравнению с классическими, позволяет найти оптимальное управление, при котором улучшаются кинематические и динамические показатели работы крана при незначительном уменьшении быстродействия.

Для оценки практической эффективности найденных оптимальных законов движения крана с грузом на гибком подвесе были проведены лабораторные экспериментальные исследования.

§3. Проведение лабораторных экспериментальных исследований и анализ полученных данных.

Целью проведения лабораторных экспериментальных исследований было установление основных показателей качества реализации оптимального управления движением модели крана при использовании частотного управления его асинхронного электропривода. В исследованиях использована лабораторная установка и оборудование, которые показаны на рис. 5.



Рис. 5

Конструкция установки позволяет исследовать оптимальные управления движением модели крана с грузом на гибком подвесе при использовании частотно-управляемого привода. Основные параметры лабораторной установки занесены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Наименование параметра	Значение
Приведенная масса крана, кг	77
Масса груза, кг	46
Эквивалентная длина гибкого подвеса груза, м	1,7
Скорость установившегося движения крана, м/с	0,66
Номинальная мощность привода механизма передвижения крана, Вт	80

В эксперименте использован частотный преобразователь FR-E700 Mitsubishi Electric, посредством которого осуществлялось управление угловой скоростью электродвигателя модели крана. К частотному преобразователю был подключен микрокомпьютер RaspberryPi, программное обеспечение которого разработано для целей проведения экспериментальных исследований: с его помощью выполнялся расчет и пересылка на СОМ-порт частотного преобразователя управляющих сигналов.

Для сбора массива экспериментальных данных использован аналого-цифровой преобразователь mDAQ-14, к которому поступали сигналы от датчика положения модели крана (линейный энкодер) и датчика угла отклонения груза от вертикали (угловой энкодер). Первый энкодер имеет абсолютную точность измерений 1 мм, а второй – $0,1^\circ$. Питание обоих датчиков осуществлялось от стабилизированного источника питания постоянного тока НУ3003М-3 MASTECH.

Пакеты данных, которые соответствовали положению модели крана и углу отклонения каната от вертикали, от АЦП mDAQ-14 поступали на USB-вход персонального компьютера, откуда с помощью специализированного программного обеспечения записывались в txt-файл. В последующем из этого файла данные импортировались в программную среду Wolfram Mathematica и соответствующим образом обрабатывались.

Все измерительное оборудование, которое использовано при проведении экспериментальных исследований, имеет соответствующие сертификаты.

Графическое представление результатов экспериментальных данных угла отклонения каната с грузом от вертикали показаны на рис. 6 (графики серого цвета показывают результаты, полученные при оптимальном управлении с классическими ограничениями на управление, а черного цвета – с модифицированными).

Из рис. 6 видно, что в конце остановки лабораторной модели крана колебания груза практически отсутствуют. В практике эксплуатации портовых перегружателей этот результат позволяет сразу переходить к последующим операциям (опускание груза на платформу, снятие груза и т.д.) и повышает производительность работы крана.

Во время установившегося движения модели видно, что груз совершает маятниковые колебания. Учет начальных фазовых координат системы (скорости модели крана, фазы колебаний груза) при определении оптимальных управлений ее движением позволил достаточно качественно устранить колебания груза к моменту остановки модели крана.

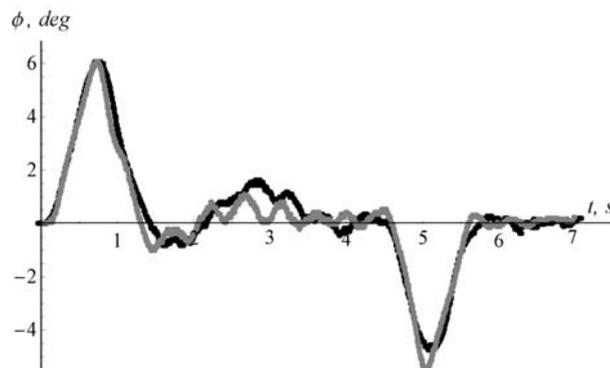


Рис. 6.

Представляет практический интерес установление причины отклонения траектории движения груза от расчетной. Это позволит принять меры для более качественной реализации оптимальных управлений на практике. Для этой цели построим графики скорости движения модели крана при оптимальных управлениях ее движением для ограничений на управление: классических (рис. 7, а) и модифицированных (рис. 7, б). На рис. 7 линия черного цвета показывает заданную (оптимальную) скорость движения модели крана.

Анализ графиков, приведенных на рис. 7, показывает незначительное отклонение скорости движения крана от оптимальных законов ее изменения. Особенно это заметно в моменты резкого изменения скорости движения крана (рис. 7, а). Для оптимального управления с модифицированными ограничениями изменение скорости в моменты переключения управления является не таким резким, что позволяет более качественно реализовать оптимальное управление на практике.

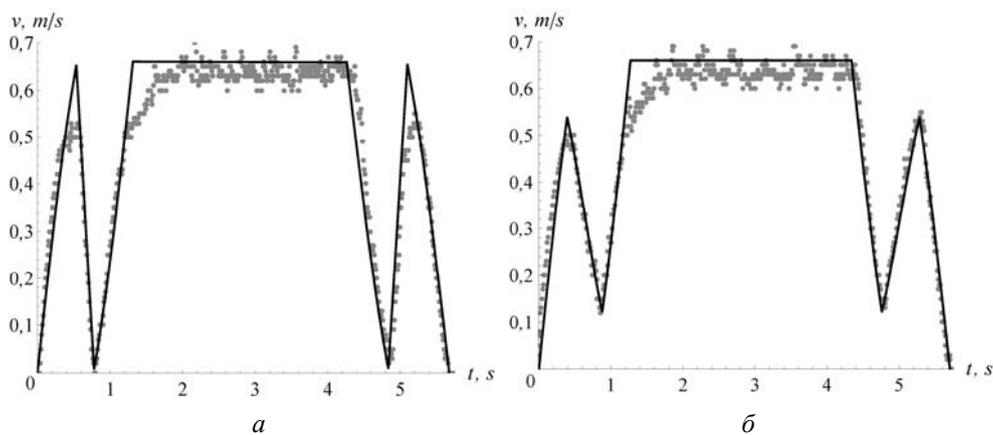


Рис. 7.

Для более точной отработки оптимального управления движением крана на практике необходимо ввести в систему управления контур обратной связи, который позволил бы регулировать отработку диаграммы изменения скорости крана средствами частотно-управляемого привода.

Заключение.

Практической проблемой, связанной с реализацией оптимального по быстродействию управления движением крана, является обеспечение качественной отработки диаграммы скорости движения крана с грузом на гибком подвесе. В этой части предпосылки следует отдать частотно-управляемому приводу, охваченному контуром обратной связи по скорости движения крана.

Сравнение оптимальных управлений, найденных при различных ограничениях на управление, показывает преимущества модифицированных ограничений по нескольким динамическим показателям и незначительное уменьшение быстродействия системы. Это позволяет снизить динамическую нагруженность металлоконструкции крана, механических передач и способствует увеличению долговечности крана.

В теоретическом плане остается неисследованной проблема влияния границ области допустимых управлений на длительность оптимального по быстродействию движения динамических систем.

Научные исследования, результаты которых опубликованы в данной статье, выполнены за счет средств бюджетной программы «Поддержка приоритетных направлений научных исследований» (КПКВК 6541230).

РЕЗЮМЕ. Проведено чисельне моделювання динаміки рухомого маятника (крана з вантажем на гнучкому підвісі) при реалізації отриманих в першій частині роботи оптимальних керувань засобами частотно-керованого приводу. Результати моделювання показали достатню для практичного

використання якості відпрацювання оптимальних керувань навіть при дії на рух системи зовнішніх стохастичних збурень (вітрового пориву). Порівняльний аналіз результатів моделювання показав, що модифіковані обмеження дозволяють у декілька разів зменшити динамічні зусилля в конструкції крана за рахунок незначного збільшення тривалості її руху. Результати експериментальних досліджень оптимальних керувань в лабораторних умовах дозволили виявити причини відхилення фактичної швидкості моделі крана із вантажем на гнучкому підвісі від заданої (оптимальної) і запропонувати методи її усунення.

1. Герасимьяк Р.П., Лецёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
2. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дисс. на соиск. степ. доктора техн. наук: 05.05.05 / Григоров Отто Владимирович. – Харьков, 1995. – 386 с.
3. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. – Одесса, 2000. – 116 с.
4. Понов Е.В. Проектирование электроприводов крановых механизмов // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 12. – 52 с.
5. Штейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
6. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Knoxville: Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
7. Chen H., Fang Y., Sun N. Optimal trajectory planning and tracking control method for overhead cranes // IET Control Theory Appl. – 2016. – 10, N 6. – P. 692 – 699.
8. Ermidoro M., Formentin S., Cologni A., Previdi F., Savaresi M.S. On time-optimal anti-sway controller design for bridge cranes // American Control Conference (ACC). – 2014. – P. 2809 – 2814.
9. 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. – 20, N 1 – P. 241 – 248.
10. Grigorov O.V., Svirgun V.P. Improving the productivity of utility cranes through optimum motion control // Soviet Machine Science. – 1986. – 6. – P. 25 – 29.
11. Khoroshun A.S. Stability and Speed Control of a Series-Wound DC Motor // Int. Appl. Mech. – 2016. – 52, N 4. – P. 432 – 436.
12. Kolar B., Rams H., Schlacher K. Time-optimal flatness based control of a gantry crane // Control Engineering Practice. – 2017. – 60. – P. 18–27.
13. Loveikin V.S., Romasevich Yu.A., Khoroshun S.A., Shevchuck A.G. Time-Optimal Control of a Simple Pendulum with a Movable Pivot. Part 1 // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 3. – P. 358 – 365.
14. Nikitina N.V. Stability Analysis of Rotary Motions of a Quadcopter // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 6. – P. 648 – 653.
15. Okun A., Los Y. The controllability function method // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. – 2016. – 78, N 3. – P 3 – 8.
16. Romacevych Y., Loveikin V., Stekhno O. Closed-loop optimal control of a system «trolley – payload» // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. – 2019. – 81, N 2. – P. 3 – 12.

Поступила 18.12.2018

Утверждена в печать 05.11.2019