

УДК 621.873

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА С ГРУЗОМ НА ГИБКОМ ПОДВЕСЕ

В.С. Ловейкин, Ю.А. Ромасевич

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (03127, Украина, г. Киев, ул. Героев Обороны, 12)

SYNTHESIS AND STUDY OF QUASIOPTIMAL QUICK ACTING MOVEMENT CONTROL OF LIFTING CRANES WITH A LOAD ON FLEXIBLE SUSPENSION

V.S. Loveikin, Iu.A. Romasevich

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12 Geroev Oborony str., Kiev, 03127, Ukraine)

Получена / Received: 27.06.2016. Принята / Accepted: 01.09.2016. Опубликовано / Published: 30.09.2016

Ключевые слова:

грузоподъемный кран, квазиоптимальное управление, принцип максимума, колебания груза, динамические нагрузки, метод роя частиц, математическая модель, трансцендентные уравнения.

Предметом исследования являются закономерности влияния квазиоптимального по быстродействию управления движением грузоподъемного крана с гибким подвесом груза на динамические характеристики движения. Цель работы заключается в синтезе квазиоптимального управления движением крана при его разгоне с устранением колебаний груза, а также в исследовании динамики движения крана при квазиоптимальном управлении.

В работе предложено перейти от оптимального по быстродействию управления движением крана к управлению, которое описывается с помощью непрерывной функции. Для обеспечения достижения системой «кран–груз» заданных конечных условий движения была составлена система алгебраических трансцендентных уравнений, которую удалось привести к задаче минимизации сложной функции трех аргументов. В результате использования метода роя частиц были найдены моменты времени, в которых происходит изменение знака управления (движущего усилия привода крана). Моделирование движения крана при квазиоптимальном управлении дало возможность найти его основные динамические характеристики при разгоне. Сравнительный анализ полученных данных показал значительное уменьшение динамических нагрузок в элементах крана. При этом длительность переходного режима движения крана в сравнении с оптимальным по быстродействию управлением увеличивается незначительно. Таким образом, путем незначительного увеличения длительности цикла передвижения крана (на десятки долей секунды) достигается увеличение долговечности крановой металлоконструкции, механических передач, двигателя, силового инвертора и других элементов.

Полученные результаты целесообразно использовать для разработки и модернизации систем управления движением грузоподъемных машин, к которым предъявляются требования значительной производительности работы, энергетической эффективности и долговечности (например, для кранов, которые интенсивно эксплуатируются в портах, на металлургических и машиностроительных предприятиях, строительных площадках, складах).

Key words:

lifting crane, quasioptimal control, maximum principle, load fluctuations, dynamic loads, particle swarm method, mathematical model, transcendental equation.

The subject of research is an influence pattern of quasioptimal quick acting movement control of lifting cranes with a load flexible suspension on dynamic movement characteristics. The purpose of the work lies in the synthesis of quasioptimal crane movement control when its accelerating with the elimination of load fluctuations, as well as in the study of the crane movement dynamics at the quasioptimal control.

The paper proposed to switch from an optimal control of crane movements to control, which is described by a continuous function. In order to achieve specified final conditions of movement by the system “crane-load” an algebraic system of transcendental equations was composed, which was led to the target of minimizing the complex function of three arguments. By using the particle swarm method points in time were found at which there was a change in the control character (the driving force of the crane actuator). Simulation of crane movements at quasioptimal control made it possible to find its basic dynamic characteristics during acceleration. Comparative analysis of the data showed a significant reduction of dynamic loads in the crane elements. The transitional regime duration of the crane movement in comparison with the optimal control increases slightly. Thus, by increasing the duration of the crane’s non-essential movement cycle (for tens of seconds) an increase in the durability of the crane steel structures, mechanical gears, motor, power inverter, and other elements is achieved.

The obtained results should be used for the development and modernization of movement control systems for lifting equipment, which require a significant productivity, energy efficiency and durability (for example, cranes that are extensively exploited in ports, metallurgical and machine-building enterprises, construction sites, warehouses).

Ловейкин Вячеслав Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования машин и оборудования (тел.: 044 527 87 34, e-mail: lovvs@ukr.net).

Ромасевич Юрий Александрович – доктор технических наук, доцент кафедры конструирования машин и оборудования (тел.: 044 527 87 34, e-mail: d.um@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Viacheslav S. Loveikin – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Machinery and Equipment Construction (tel.: 044 527 87 34, e-mail: lovvs@ukr.net).

Iurii A. Romasevich – Doctor of Technical Science, Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment Construction (tel.: 044 527 87 34, e-mail: d.um@mail.ru). The contact person for correspondence.

Введение

Большое количество грузоподъемных кранов работает в условиях интенсивных грузопотоков. К таким кранам, например, можно отнести портовые перегружатели. Уменьшение продолжительности цикла перемещения грузов в этом случае является желательным. Поэтому для управления движением кранами целесообразно использовать оптимальное по быстродействию управление, которое, как известно, имеет релейную характеристику [1–7]. Это вызывает дополнительные динамические нагрузки и, как следствие, снижает надежность грузоподъемной машины [8]. Для уменьшения динамических усилий при одновременно высокой производительности работы крана необходимо выполнить синтез квазиоптимального управления его движением.

Анализ исследований и публикаций по теме

При нахождении оптимального по быстродействию управления движением крана с грузом на гибком подвесе широкое использование получил принцип максимума [1–11], который, однако, дает лишь количественную информацию о виде функции управления. Для определения моментов переключения управляющего воздействия (перехода от максимального управления к минимальному) в работах Р.П. Герасимяка [1] и его учеников [2–4] решены системы трансцендентных алгебраических уравнений. В работе О.В. Григорова [5], кроме того, учтены ограничения на скорость и ускорение крана, а также отклонение каната с грузом от вертикали. Для определения моментов переключения управления в работе [5] проведен анализ фазовых траекторий, описывающих колебательное движение груза на гибком подвесе.

В работе [12] исследованы динамические нагрузки, возникающие в упругих элементах механизма поворота башенного грузоподъемного крана при реализации оптимального по быстродействию разгона системы. На основе проведенных исследований предложено изменять управляющую функцию (приводной момент) по экспоненте и установлено влияние постоянной времени экспоненты на коэффициент динамичности механизма. Такой подход позволяет значительно снизить динамические нагрузки в крановых механизмах.

В большинстве работ иностранных исследователей, в которых решены задачи синтеза оптимального управления движением механизмов

грузоподъемных кранов, используются методы синтеза линейно-квадратичных регуляторов [13–21]. Суть такого подхода заключается в том, что систему «кран–груз» представляют в виде объекта регулирования, в котором необходимо обеспечить отсутствие колебаний груза относительно точки его подвеса. Эти исследования позволили получить оптимальные законы регулирования движения механизма передвижения крана. Благодаря их использованию можно устранить колебания груза на гибком подвесе с учетом фактической фазы колебаний и минимизировать нежелательные характеристики движения системы, которые представлены в виде интегральных функционалов с подинтегральными квадратичными функциями.

В рассмотренных работах отсутствует решение задачи синтеза программного оптимального управления, при котором удастся достичь значительного быстродействия движения системы «кран–груз» при одновременном уменьшении динамических нагрузок в элементах крана, что определяет актуальность данного исследования.

Постановка цели и задач исследования

Целью исследования являются синтез и исследование квазиоптимального по быстродействию управления движением крана с грузом на гибком подвесе. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) выполнить синтез квазиоптимального по быстродействию управления движением крана с грузом на гибком подвесе; 2) исследовать динамику движения крана с грузом на гибком подвесе при реализации квазиоптимального по быстродействию управления.

Синтез и исследование квазиоптимального по быстродействию управления движением грузоподъемного крана с грузом на гибком подвесе

1. Синтез квазиоптимального управления движением грузоподъемного крана с грузом на гибком подвесе.

Для проведения исследований сначала примем двухмассовую динамическую модель крана с грузом на гибком подвесе, которая изображена на рис. 1.

Высокочастотные колебания металлоконструкции крана и его привода не имеют влияния на низкочастотные колебания груза на гибком подвесе. Поэтому модель, которая

изображена на рис. 1, достаточно часто используется в динамических расчетах кранов [22, 23].

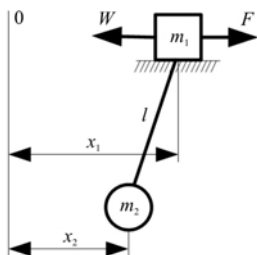


Рис. 1. Динамическая двухмассовая модель системы «кран–груз»

Динамическая модель, которая показана на рис. 1, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1; \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – приведенная к поступательному движению масса крана и его привода; m_2 – масса груза; x_1, x_2 – координаты центров масс соответственно крана и груза; F – тяговое или тормозное усилие, действующее на кран; W – приведенная сила сопротивления перемещению крана; g – ускорение свободного падения; l – длина гибкого подвеса. Будем считать, что при перемещении крана в течение разгона (торможения) его скорость не меняет свой знак, т.е. $\operatorname{sign} \dot{x}_1 = 1$.

Для дальнейшего рассмотрения примем оптимальное управление движением крана, которое найдено в работах [1, 3, 5, 6, 8, 10]:

$$F_{opt} = \begin{cases} F_{max}, & 0 \leq t < \tilde{t}_1; \\ -F_{max}, & \tilde{t}_1 \leq t < \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2; \\ F_{max}, & \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 \leq t < \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \tilde{t}_3, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{t}_3$ – длительность соответственно первого, второго и третьего этапов разгона крана при оптимальном управлении; F_{max} – максимальное значение приводного усилия, которое действует на кран (в данном исследовании принято предположение о симметричности предельных значений управления, т.е. максимальное управление равно минимальному, взятому с противоположным знаком). Сущность управления движением системы «кран–груз» заключается в том, что функция управления (1) имеет разрывы – скачкообразные переходы от максимального до минимального значения и наоборот. Это приводит к

возникновению нагрузок в элементах крана (валах, муфтах, металлоконструкции) и повышенным энергозатратам. Для того чтобы уменьшить нежелательные показатели при оптимальном по быстродействию управлении, выполняют его модификацию [12], т.е. переходят к квазиоптимальному управлению. Однако при этом не устраняются мягкие удары в механических передачах, что сопровождается возникновением значительных динамических нагрузок в элементах крана. Очевидно, что для уменьшения динамических усилий необходимо для управления движением крана использовать более плавную функцию. Для этого оптимальную по быстродействию функцию управления движением крана с грузом на гибком подвесе F_{opt} модифицируем, т.е. перейдем к непрерывной функции, которая описывает квазиоптимальное по быстродействию управление системой «кран–груз»:

$$F_{opt}^* = \begin{cases} -\frac{F_{max} t(t - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & 0 \leq t < \Delta t; \\ F_{max}, & \Delta t \leq t < t_1 - \Delta t; \\ -\frac{F_{max} (t - t_1)(t - t_1 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 - \Delta t \leq t < t_1; \\ \frac{F_{max} (t - t_1)(t - t_1 - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 \leq t < t_1 + \Delta t; \\ -F_{max}, & t_1 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 - \Delta t; \\ \frac{F_{max} (t - t_1 - t_2)(t - t_1 - t_2 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2; \\ -\frac{F_{max} (t - t_1 - t_2)(t - t_1 - t_2 - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 \leq t < t_1 + t_2 + \Delta t; \\ F_{max}, & t_1 + t_2 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t; \\ -\frac{F_{max} (t - t_1 - t_2 - t_3)(t - t_1 - t_2 - t_3 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3, \end{cases} \quad (3)$$

где t_1, t_2, t_3 – длительность соответственно первого, второго и третьего этапов разгона крана при квазиоптимальном управлении; Δt – длительность переходов от максимального значения F_{max} к нулю, которая может меняться в зависимости от требований плавности изменения управления: при увеличении плавности изменения функции F_{opt}^* значение Δt увеличивается.

Укажем некоторые математические свойства функции (3), которые влияют на динамику движения системы. Стоит отметить, что функция (3) доставляет абсолютные минимумы нескольким интегральным и терминальным функционалам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^{t_1+t_2+t_3} (\ddot{F}_{opt}^*)^2 dt = abs \min = 0; \\ \int_{\Delta t}^{t_1-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt + \int_{t_1+\Delta t}^{t_1+t_2-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt + \\ + \int_{t_1+t_2+\Delta t}^{t_1+t_2+t_3-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt = abs \min = 0; \\ (\dot{F}_{opt}^*(\Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1 - \Delta t))^2 = \\ = (\dot{F}_{opt}^*(t_1 + \Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1 + t_2 - \Delta t))^2 = \\ = (\dot{F}_{opt}^*(t_1 + t_2 + \Delta t))^2 = \\ = (\dot{F}_{opt}^*(t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t))^2 = abs \min = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Приведенные выражения (4) свидетельствуют о плавном изменении усилия при реализации квазиоптимального управления движением крана с грузом на гибком подвесе, что уменьшает динамические нагрузки в элементах крана.

Оптимальное управление движением крана должно устранять колебания груза в момент выхода крана на номинальную скорость. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t_1 + t_2 + t_3) = v_{ном}; \\ \ddot{x}_2(t_1 + t_2 + t_3) = \ddot{x}_2(t_1 + t_2 + t_3) = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $v_{ном}$ – номинальная скорость движения крана с грузом в конце разгона. Для нахождения скорости движения крана, а также ускорения и рывка груза в момент времени $t_1 + t_2 + t_3$ необходимо 9 раз проинтегрировать систему дифференциальных уравнений (1) для каждого «куска» функции F_{opt}^* . При этом начальные условия первого этапа движения системы «кран–груз», который соответствует первому «куску» функции F_{opt}^* , принимаются равными нулю (рассматривается движение системы «кран–груз» из состояния покоя). В общем случае для всех этапов разгона динамической системы «кран–груз» начальные условия движения масс текущего этапа являются конечными условиями движения масс на предыдущем этапе. Не будем приводить результаты описанных расчетов, поскольку они имеют значительный объем. В результате были получены выражения скорости движения крана, а также ускорения и рывка груза в момент времени $t_1 + t_2 + t_3$ и сформирована система уравнений (5). Таким образом, найдя неизвестные значения t_1 , t_2 и t_3 из системы трансцендентных уравнений (5), можно обеспечить устранение колебаний груза в конце разгона крана.

Аналитическое решение системы (5) затруднительно. Поэтому была определена следующая функция:

$$f = (\dot{x}_1(t_1 + t_2 + t_3) - v_{ном})^2 + \ddot{x}_2^2(t_1 + t_2 + t_3) + \ddot{x}_2^2(t_1 + t_2 + t_3). \quad (6)$$

Для нахождения значений t_1 , t_2 и t_3 , при которых функция (6) достигает глобального минимума, был использован метод роя частиц [24]. Его выбор можно объяснить простотой его алгоритмизации (что особенно важно в практической реализации найденного квазиоптимального управления) и нечувствительностью к локальным экстремумам исследуемой функции f . Для решения было использовано 6 частиц. Решение удалось найти через 10 итераций.

Для иллюстрации найденного квазиоптимального по быстродействию управления движением крана с грузом на гибком подвесе на рис. 2 приведены графические зависимости.

На рис. 2 графики серого цвета соответствуют известному управлению, которое описывается функцией (2), а графики черного цвета – управлению квазиоптимальному по быстродействию (3). Движущее усилие на рис. 2, а представлено в относительных единицах, которые получены путем деления величины F_{opt} и F_{opt}^* на F_{max} . Все графики построены для следующих значений: $l = 10$ м, $m_1 = 100$ т; $m_2 = 50$ т; $F_{max} = 100$ кН; $v_{ном} = 1,2$ м/с; $\Delta t = 0,2$ с.

Анализ графиков, которые изображены на рис. 2, показывает, что квазиоптимальное управление движением крана (3) представляется плавной функцией, которая не имеет разрывов первого и второго рода. Амплитуда колебаний груза в обоих случаях практически одинакова (см. рис. 2, б). Для установления преимуществ найденного квазиоптимального управления F_{opt}^* перед известным F_{opt} проведем детальный анализ динамики движения крана.

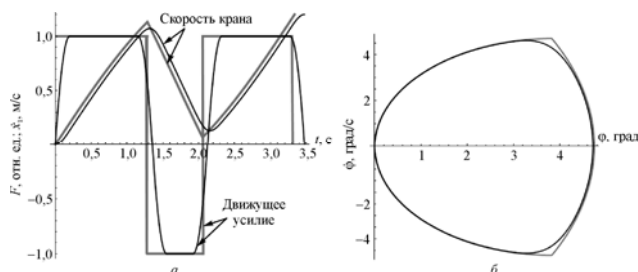


Рис. 2. Графики динамики движения крана при разгоне: а – движущее усилие и скорость движения крана; б – фазовый портрет колебаний груза на гибком подвесе

2. Анализ динамики крана при квазиоптимальном управлении его движением.

Оценим влияние квазиоптимального управления на динамику движения крана с грузом на гибком подвесе. Для этого перейдем к рассмотрению более детальной динамической модели крана с грузом на гибком подвесе, которая учитывает упругие колебания пролетной конструкции крана (рис. 3).

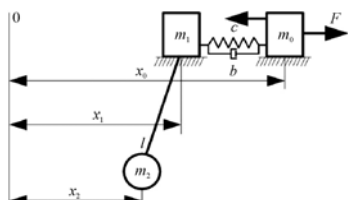


Рис. 3. Динамическая трехмассовая модель системы «кран–груз»

На рис. 3 введены следующие обозначения: c – приведенное значение упругости крановых балок в поперечном направлении; b – приведенное значение коэффициента диссипации крановых балок в поперечном направлении; m_0 , m_1 , m_2 – приведенные к поступательному движению массы крана, крановой тележки и груза соответственно; x_0 , x_1 , x_2 – обобщенные координаты соответствующих масс. Остальные обозначения аналогичны принятым на рис. 1. Динамическая модель, показанная на рис. 3, позволяет оценить динамическую нагруженность металлоконструкции крана и установить характер протекания высокочастотных колебательных процессов в крановой балке. Движение динамической модели, которая изображена на рис. 3, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c(x_0 - x_1) + b(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_0; \\ m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \frac{g}{l}(x_1 - x_2) = c(x_0 - x_1) + b(\dot{x}_0 - \dot{x}_1); \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Одно из свойств найденного квазиоптимального управления движением крана с грузом на гибком подвесе таково, что при увеличении Δt увеличивается длительность переходных процессов. Оценим, как при этом изменяется динамическая нагруженность работы крановой балки. Для этого введем в рассмотрение показатель кратности максимального усилия в крановой балке:

$$k = \frac{F_{\max, \text{балка}}^{\text{optimal}}}{F_{\max, \text{балка}}^{\text{quasi-optimal}}}, \quad (8)$$

где $F_{\max, \text{балка}}^{\text{optimal}}$ и $F_{\max, \text{балка}}^{\text{quasi-optimal}}$ – значения максимальных усилий в балке при оптимальном F_{opt} и квазиоптимальном F_{opt}^* управлении соответственно. Кроме того, будем использовать интегральный оценочный показатель:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \tilde{t}_3} \int_0^{\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \tilde{t}_3} (F_{\text{балка}}^{\text{optimal}})^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{t_1 + t_2 + t_3} \int_0^{t_1 + t_2 + t_3} (F_{\text{балка}}^{\text{quasi-optimal}})^2 dt}}, \quad (9)$$

где $F_{\text{балка}}^{\text{optimal}}$ и $F_{\text{балка}}^{\text{quasi-optimal}}$ – функции, которые описывают изменение усилий в крановой балке при оптимальном F_{opt} и квазиоптимальном F_{opt}^* управлении соответственно.

Для оценки увеличения длительности разгона при квазиоптимальном управлении введем показатель

$$\Delta T = t_1 + t_2 + t_3 - (\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \tilde{t}). \quad (10)$$

Терминальный показатель (8) позволяет оценить соотношение максимальных усилий в крановой балке при разных управлениях его движением. Соотношение среднеквадратичных за время разгона крана усилий при разных видах управлений движением оценивается с помощью показателя (9).

На рис. 4 показаны графики зависимости показателей k , I и ΔT от значения Δt , которые получены путем моделирования движения крана с грузом на гибком подвесе при оптимальном F_{opt} и квазиоптимальном F_{opt}^* управлении.

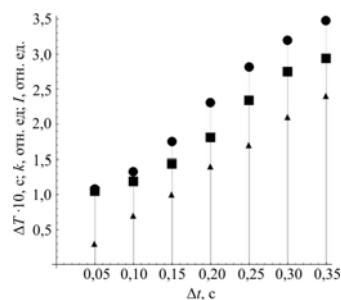


Рис. 4. Графики зависимости показателей k (■), I (●) и ΔT (▲) от величины Δt

Анализ полученных графических зависимостей позволяет сделать вывод: значительное уменьшение динамических нагрузок в крановой металлоконструкции достигается даже при незначительных величинах Δt . Расчеты показателей k , I и ΔT проведены для максимального значения $\Delta t = 0,35$ с. Большее значение не позволяет реализовать квазиоптимальный режим движения крана. Таким

образом, необходимо разгон крана осуществлять при максимальном значении Δt , что позволяет значительно уменьшить динамическую нагруженность крана и увеличить его долговечность.

Разработку алгоритмов расчета максимального значения Δt , при котором возможна реализация квазиоптимального управления движением крана, предполагается провести в последующих исследованиях. Кроме того, неисследованными остаются энергетические показатели движения крана при квазиоптимальном управлении.

Выводы

В работе синтезирован квазиоптимальный по быстродействию закон управления движением крана с грузом на гибком подвесе,

который позволяет в 2,9–3,5 раза уменьшить динамические нагрузки, воспринимаемые крановой металлоконструкцией. При этом продолжительность разгона (или торможения) крана увеличивается лишь на 0,24 с. Кроме того, реализация найденного управления движением крана не встречает принципиальных трудностей со стороны электропривода, поскольку квазиоптимальный закон описывается непрерывной функцией времени.

Найденные результаты целесообразно использовать для разработки новых и модернизации существующих систем управления движением кранов пролетной конструкции, которые интенсивно эксплуатируются.

Список литературы

1. Герасимьяк Р.П., Лещёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
2. Логвиненко К.С. Підвищення якості перехідних процесів складних електромеханічних систем кранових механізмів: автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук. – Одесса, 2003. – 24 с.
3. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Одесса, 2000. – 116 с.
4. Бушер В.В. Асинхронный электропривод подъемно-транспортных механизмов с микропроцессорным управлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Одесса, 1993. – 16 с.
5. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.05. – Харьков, 1995. – 386 с.
6. Смехов А.А., Ерофеев Н.И. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
7. Поляков Л.Н. Разработка и исследование оптимальной системы управления электроприводом крановой тележки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Харьков, 1973. – 23 с.
8. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
9. Зайцев Ю.И. Исследование нестационарных колебаний и оптимальные режимы работы грузоподъемных машин с поступательными движениями: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Харьков, 1981. – 259 с.
10. Kuntze H.-B. Zur zeitoptimalen Steuerung und Regelung von Lauftränen // Wissenschaftliche Zeitschrift für Verkehrswesen. – 1971. – № 4. – S. 973–990.
11. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1: Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин [и др.]; под. общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
12. Найденко Е.В. Управление асинхронным электроприводом механизма поворота с подвешенным грузом: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Одесса, 2009. – 149 с.
13. Optimal tracking with sway suppression control for a gantry crane system / M.A. Ahmad, R.M.T. Raja Ismail, M.S. Ramli, N.M. Abdul Ghani, M.A. Zawawi // European journal of scientific research. – 2009. – Vol. 33, № 4. – P. 630–641.
14. Control schemes for input tracking and anti-sway control of a gantry crane / M.A. Ahmad, A.N.K. Nasir, R.M.T. Raja Ismail, M.S. Ramli // Australian Journal of basic and applied sciences. – 2010. – № 4 (8). – P. 2280–2291.
15. Development of feedforward anti-sway control for highly efficient and safety crane operation / N. Miyata, T. Ukita, M. Nishioka, T. Monzen, T. Toyohara // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2001. – Vol. 38, № 2. – P. 73–77.
16. Development of vibration control system on container crane girder / O. Yoshiaki, S. Kono, K. Uchida, T. Fujii, T. Monzen // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 1997. – Vol. 34, № 3. – P. 105–109.
17. Yoshida Y. Feedback control and time-optimal control about overhead crane by visual servo and these combination control // Intelligent Mechatronics. – Rijeka, 2011. – P. 103–118.
18. Tanaka S., Kouno S. Automatic measurement and control of the attitude of crane lifters lifter-attitude measurement and control // Control Engineering Practice. – 1998. – Is. 9, vol. 6. – P. 1099–1107. DOI: 10.1016/S0967-0661(98)00104-X.
19. Control of container crane by binary input using mixed logical dynamical system / Y. Konishi, N. Araki, Y. Tanaka, H. Ishigaki // ICIC Express Letters. – 2008. – Vol. 2, № 4. – P. 415–419. DOI: 10.1109/ICCAS.2008.4694521.
20. Time optimal control of 3d crane / M. Pauluk, A. Korytowski, A. Tuma, M. Szymkat. – Krakow, 2002. – 6 s.
21. Golareshani A.R. Modeling and optimal control of tower crane motions: the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. – Ontario, 1999. – 119 p.
22. Казак С.А. Динамика мостовых кранов. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
23. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
24. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, 1995. – P. 1942–1948.

References

1. Gerasimiak R.P., Leshchov V.A. Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh sistem [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems]. Odessa: SMIL, 2008, 192 p.
2. Logvinenko K.S. Povyshenie kachestva perekhodnykh protsessov slozhnykh elektromekhanicheskikh sistem kranovykh mekhanizmov [Improving the transient processes' quality in complex electromechanical systems of crane mechanisms]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Odessa, 2003, 24 p.
3. Mel'nikova L.V. Avtomatizatsiia tekhnologicheskogo protsessa peremeshcheniia mekhanizma s podveshennym gruzom sredstvami mikroprotssornogo upravleniia [Automation of technological process of mechanism moving with a suspended load by means of the microprocessor control]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. Odessa, 2000, 116 p.
4. Buser V.V. Asinkhronnyi elektroprivod pod"emno-transportnykh mekhanizmov s mikroprotssorym upravlenim [Asynchronous electric drive of lifting and transport mechanisms with microprocessor control]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. Odessa, 1993, 16 p.
5. Grigorov O.V. Sovershenstvovanie rabochikh kharakteristik kranovykh mekhanizmov [Improving the performance of crane mechanisms]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.05. Khar'kov, 1995, 386 p.
6. Smekhov A.A., Erofeev N.I. Optimal'noe upravlenie pod"emno-transportnymi mashinami [Optimal control of lifting and transport machinery]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 239 p.
7. Poliakov L.N. Razrabotka i issledovanie optimal'noi sistemy upravleniia elektroprivodom kranovoi teleshki [Development and research of optimal motor control system of the crane trolley]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. Khar'kov, 1973, 23 p.
8. Chernous'ko F.L., Akulenko L.D., Sokolov B.N. Upravlenie kolebaniiami [Fluctuations management]. Moscow: Nauka, 1980, 384 p.
9. Zaitsev Iu.I. Issledovanie nestatsionarnykh kolebani i optimal'nye rezhimy raboty gruzopod"emnykh mashin s postupatel'nymi dvizheniiami [Study of unsteady fluctuations and optimal modes of operation of lifting equipment with the translational motion]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.06. Khar'kov, 1981, 259 p.
10. Kuntze H.-B. Zur zeitoptimalen Steuerung und Regelung von Lauftrannen. *Wissenschaftliche Zeitschrift für Verkehrswesen*, 1971, no.4, pp.973-990.
11. Braude V.I., Gokhberg M.M., Zviagin I.E. et al. Ed. Gokhberg M.M. Spravochnik po kranam: v 2 tomakh. Tom. 1: Kharakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranom, ikh privodov i metallicheskikh konstruksii [Handbook on cranes: in 2 vol. Vol. 1: Properties of materials and loads. Basis for crane, their drives and metal constructions calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 536 p.
12. Naidenko E.V. Upravlenie asinkhronnym gruzom [Asynchronous electric drive's control of rotation mechanism with a suspended load]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. Odessa, 2009, 149 p.
13. Ahmad M.A., Raja Ismail R.M.T., Ramli M.S., Abdul Ghani N.M., Zawawi M.A. Optimal tracking with sway suppression control for a gantry crane system. *European journal of scientific research*, 2009, vol.33, no.4, pp.630-641.
14. Ahmad M.A., Nasir A.N.K., Raja Ismail R.M.T., Ramli M.S. Control schemes for input tracking and anti-sway control of a gantry crane. *Australian Journal of basic and applied sciences*, 2010, no.4 (8), pp.2280-2291.
15. Miyata N., Ukita T., Nishioka M., Monzen T., Toyohara T. Development of feedforward anti-sway control for highly efficient and safety crane operation. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, 2001, vol.38, no.2, pp.73-77.
16. Yoshiaki O., Kono S., Uchida K., Fujii T., Monzen T. Development of vibration control system on container crane girder. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, 1997, vol. 34, no.3, pp.105-109.
17. Yoshida Y. Feedback control and time-optimal control about overhead crane by visual servo and these combination control. *Intelligent Mechatronics*. Rijeka, 2011, pp.103-118.
18. Tanaka S., Kouno S. Automatic measurement and control of the attitude of crane lifters lifter-attitude measurement and control. *Control Engineering Practice*, 1998, is.9, vol.6, pp.1099-1107. DOI: 10.1016/S0967-0661(98)00104-X.
19. Konishi Y., Araki N., Tanaka Y., Ishigaki H. Control of container crane by binary input using mixed logical dynamical system. *ICIC Express Letters*, 2008, vol.2, no.4, pp.415-419. DOI: 10.1109/ICCAS.2008.4694521.
20. Pauluk M., Korytowski A., Turnau A., Szymkat M. Time optimal control of 3d crane. Krakow, 2002, 6 p.
21. Golafshani A.R. Modeling and optimal control of tower crane motions: the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. Ontario, 1999, 119 p.
22. Kazak S.A. Dinamika mostovykh kranov [Dynamics of bridge cranes]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 331 p.
23. Lobov N.A. Dinamika gruzopod"emnykh kranov [Dynamics of lifting cranes]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 160 p.
24. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, 1995, pp.1942-1948.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ловеikin В.С., Ромасевич Ю.А. Синтез и исследование квазиоптимального по быстродействию управления движением грузоподъемного крана с грузом на гибком подвесе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №20. – С.286–292. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.20.9

Please cite this article in English as:

Loveikin V.S., Romasevich Iu.A. Synthesis and study of quasioptimal quick acting movement control of lifting cranes with a load on flexible suspension. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.20, pp.286–292. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.20.9