

ОПТИМАЛЬНІ РЕЖИМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНА

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук
В. В. Крушельницький, здобувач*
e-mail: lovvs@ukr.net

Анотація. Дана робота присвячена оптимальним режимам керування механізмом переміщення мостового крана, при яких динамічні навантаження в металоконструкції та приводі зводяться до мінімуму. Зменшення цих негативних факторів підвищує продуктивність та надійність крана в цілому. Поставлена задача є досить актуальною і потребує глибшого вивчення, вирішення якої полягає в тому, щоб розганяти привод механізму переміщення крана на стадії пуску в такому режимі, який дозволить системі рухатись плавно без додаткових різких коливань. Дослідження виконані з використанням чотиримасової динамічної моделі крана та системи диференціальних рівнянь, що описують її рух. Для оптимізації перехідного процесу пуску механізму переміщення крана використано комплексний критерій, у який входять чотири складових. В результаті розв'язку диференціального рівняння методом колокації з різними варіаціями вагових коефіцієнтів отримані оптимальні режими керування, які представлені у вигляді графічних залежностей, що характеризують процес пуску механізму переміщення крана, аналіз яких показав, що під час переміщення вантажу краном динамічні навантаження в металоконструкції і приводі зводяться до мінімуму. Слід відмітити, що після закінчення перехідного процесу пуску, коливання вантажу відсутні. Теоретичні дослідження виконувалися для крана мостового типу вантажопідйомністю 20 тон. Отримані режими можна використати для розробки системи керування мостового крана на базі мікроконтролера. Використання такої системи дає можливість зменшити динамічні навантаження, що виникають у металоконструкції та приводному механізмі, під час переміщення вантажу краном.

Ключові слова: мостовий кран, привод, пуск, динамічна модель, математична модель, режими руху, механізм переміщення, динамічні навантаження, аналіз

*Науковий керівник – доктор технічних наук В. С. Ловейкін

© В. С. Ловейкін, В. В. Крушельницький, 2017

Постановка проблеми. Крани мостового типу широко використовуються для переміщення вантажу на будмайданчиках, виробничих цехах і ремонтних майстернях тощо. Відомо, що при переміщенні вантажу краном в елементах привода механізму переміщення крана, а також і в несучій металоконструкції протікають небажані процеси, які приводять до виникнення динамічних навантажень. Проблема мінімізації динамічних навантажень у приводі та металоконструкції, зумовлена зростанням швидкостей робочих рухів, є досить актуальною на даний час.

Слід відзначити, що найбільші динамічні навантаження виникають під час процесів пуску та гальмування механізмів, також коливання вантажу, котрі виникають при переміщенні крана сприяють зростанню навантажень, які негативно впливають на роботу мостового крана. Таким чином, зменшується продуктивність крану, його надійність і, як наслідок, підвищується можливість виникнення під час роботи аварійних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [1] запропоновано оптимізувати перехідний процес пуску механізму горизонтального переміщення, шляхом керування привідним моментом двигуна, при якому забезпечується мінімальна тривалість пуску/гальмування і до кінця перехідного процесу відсутні коливання вантажу. Для гасіння пружних коливань як у лінійній моделі, так і в моделі з розподіленими параметрами автори роботи [2] запропонували модальний регулятор. Для досліджень використовувалася спрощена двомасова динамічна модель, в якій прийнято, що візок нерухомо закріплений в середині балки. Для дослідження раціональних експлуатаційних режимів вертикального переміщення мостового крана в роботі [3] запропонували використовувати електро-механічну систему на базі мікроконтролера, контролюючи темп наростання динамічних навантажень при заданій продуктивності. Для досліджень механічної системи використовувалась двомасова динамічна модель. В роботі [4] досліджували динамічні навантаження в елементах мостового крана для підвищення його продуктивності, при умові, що вантаж до кінця перехідного процесу не розгойдується, а час перехідного процесу мінімальний при оптимальному релейному керуванні електроприводом. На основі тримасової динамічної моделі встановлено, що тривалість перехідного процесу має бути кратною періоду коливань механізму переміщення. З метою обмеження динамічних навантажень в елементах крана запропоновано спосіб оптимального керування електроприводом механізму переміщення та розроблено рекомендації щодо здійснення перемикачів керуючого впливу. В Донбаській машинобудівній академії [5] запропоновано

використовувати хвильову ланцюгову передачу в якості динамічного гасника коливань металоконструкцій мостових кранів, яка дає змогу знизити коефіцієнт динамічності та збільшити термін служби головної балки. Для зменшення динамічних навантажень у роботах [6, 7] запропоновано використовувати гумові кільця для ходових коліс візка крана мостового типу. Проведений теоретичний та експериментальний динамічний аналіз при пересуванні вантажного візка, що дало змогу точно визначити зусилля в пружних зв'язках, частоту коливань і амплітуду коливань при пересуванні ходових кранових коліс. Автори роботи [8] поєднали нелінійне прогнозування контролю моделі з оцінкою і горизонтального переміщення для оптимального керування мостовим краном. Реалізація в реальному часі такого комбінованого оптимального керування при оцінці цього підходу за часом виконання набагато нижча часу вибірки. Для керування прольотним краном автори роботи [9] застосували адаптивний ковзний режим нечіткої логіки. Їхня система лінеаризації перетворює двовимірну систему в дві незалежні системи, які мають однакову динамічну модель та включають в себе підсистему позиціонування та підсистему антиколивання. В роботі [10] розглянуто можливість визначення оптимального значення гальмівного моменту методом багатопараметричного багатфакторного аналізу динаміки вантажопідіймальних кранів, при цьому використано математичну модель чотиримасової динамічної моделі крана, а для розрахунків автори використали узагальнену функцію бажаності Харрінгтона. Автори роботи [11] розробили систему керування взаємопов'язаним електроприводом пересування мостового крана з використанням генетичних алгоритмів, що дало можливість забезпечити пересування мостового крана без взаємодії реборд коліс з рейками. В роботі [12] проводили дослідження динаміки руху мостового крана з використанням контролера нечіткої логіки на основі тривимірної імітаційної моделі, за допомогою графічного середовища моделювання MatLAB-SIMULINK з різною кількістю функцій приналежності. Дослідження виконувалися при одночасній роботі механізмів переміщення моста крана і візка, при умові, що пуск візка відбувається через чотири секунди після запуску привода мостової балки крану. Використання контролера нечіткої логіки у якості керуючого пристрою зводить до мінімуму коливання вантажу під час переміщення крана.

Однак слід зазначити, що попри всі дослідження проведені з різними механізмами вантажопідійомних машин, мало приділено уваги режимам керування механізмом переміщення крана, при яких коливання вантажу та динамічні навантаження в приводному механізмі і металоконструкції зводяться до мінімуму.

Мета досліджень полягає у дослідженні оптимальних режимів керування механізмом переміщення крана при яких зменшується вплив динамічних навантажень на металоконструкцію та привод під час переміщення вантажу.

Результати досліджень. Для дослідження оптимальних режимів керування механізмом переміщення мостового крана використовуємо чотиримасову динамічну модель (рис. 1) [13].

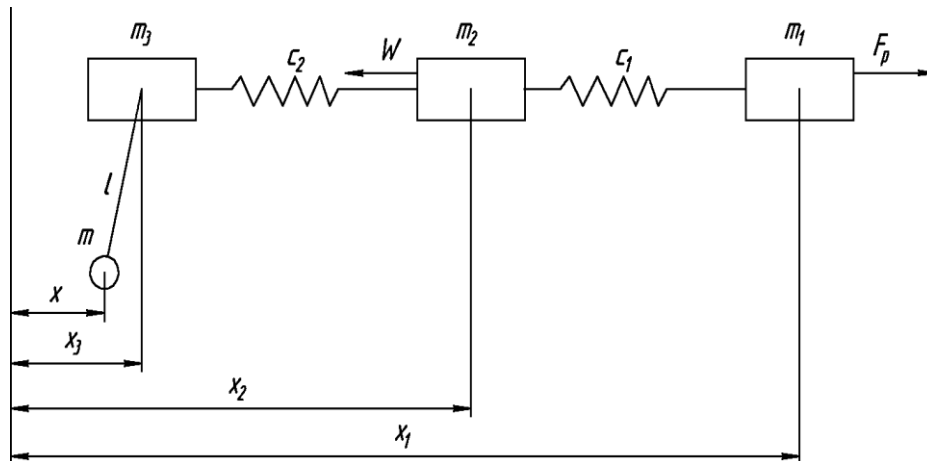


Рис. 1. Чотиримасова динамічна модель мостового крана.

Динамічна модель, що зображена на рис. 1, включає в себе зведені маси m , m_1 , m_2 , m_3 відповідно вантажу, привода, кінцевих балок та балки з крановим візком. Приведена маса привода m_1 з'єднана з масою кінцевих балок пружним елементом з жорсткістю c_1 . До маси привода прикладене рушійне зусилля F_p . Зведена маса кінцевих балок з'єднана з масою балки і крановим візком пружним елементом з жорсткістю c_2 . До маси кінцевих балок прикладена сила опору переміщення крана W . Приведена маса балки крана з візком з'єднана з вантажем гнучким елементом довжиною l . В цій моделі x , x_1 , x_2 , x_3 узагальнені координати приведених мас вантажу, привода, кінцевих балок і балки з крановим візком відповідно. Чотиримасова модель крана (рис.1) описується наступною системою диференціальних рівнянь руху:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = F_p; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_1(x_1 - x_2) + c_2(x_2 - x_3) = -W; \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_2(x_2 - x_3) + \frac{mg}{l}(x_3 - x) = 0; \\ \ddot{x} - \frac{g}{l}(x_3 - x) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де: g – прискорення вільного падіння.

З моделі (1) визначено швидкість для зведеної маси привода, яка після перетворень має вигляд:

$$\dot{x}_1 = \frac{x \cdot l \cdot m_2 \cdot m_3}{c_1 \cdot c_2 \cdot g} + \frac{x(c_1 \cdot l \cdot m_3 + g \cdot m_2(m + m_3) + c_2 \cdot l(m_2 + m_3))}{c_1 \cdot c_2 \cdot g} + \frac{\ddot{x}(c_1 \cdot c_2 \cdot l + c_1 \cdot g(m + m_3) + c_2 \cdot g(m + m_2 + m_3))}{c_1 \cdot c_2 \cdot g} + \dot{x}. \quad (2)$$

Для реалізації оптимальних режимів керування, з урахуванням виразу (2), крайові умови руху матимуть вигляд:

$$\begin{cases} t=0; x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; x^{IV}=0; x^V=0; x^{VI}=0; x^{VII}=0; \\ t=T; x=\frac{V \cdot T}{2}; \dot{x}=V; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; x^{IV}=0; x^V=0; x^{VI}=0; x^{VII}=0. \end{cases} \quad (3)$$

Для оптимізації режиму пуску механізму переміщення крана, представленою чотиримасовою динамічною моделлю використовуємо комплексний критерій, в який входять середньоквадратичні значення зусилля, що виникає в мостовій балці $F_{м.б.}$, зусилля в кінцевих балках крана $F_{к.б.}$, сила інерції, що діє на вантаж $F_{i.в.}$ та додаткова

складова $\frac{1}{2} m \cdot \frac{\ddot{\ddot{x}}}{\tilde{I}}$, яка введена штучно для підняття порядку

рівняння, щоб забезпечити крайові умови (3), а $\tilde{I} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} m \cdot (\ddot{\ddot{x}})^2 dt$, тут

$\ddot{\ddot{x}}$ – оптимальний закон руху за критерієм додаткової складової в (4). Комплексний критерій представлений у вигляді інтегрального функціоналу, який необхідно мінімізувати:

$$K = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\delta_1 \cdot \left(\frac{F_{м.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_2 \cdot \left(\frac{F_{i.в.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_3 \cdot \left(\frac{F_{к.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_4 \cdot \left(\frac{\frac{1}{2} m \cdot \ddot{\ddot{x}}}{\tilde{I}} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де: $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – вагові коефіцієнти, що враховують долю кожної складової в критерії. Для того, щоб додаткова складова незначно впливала на величину критерію (4) ваговий коефіцієнт δ_4 приймається на декілька порядків меншим в порівнянні з коефіцієнтами $\delta_1, \delta_2, \delta_3$.

Визначимо мінімально можливе значення \tilde{I} :

$$\tilde{I} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} m \cdot (\ddot{\ddot{x}})^2 dt. \quad (5)$$

Умовою мінімуму виразу (5) є рівняння Ейлера-Пуассона [14]. Після перетворень запишемо рівняння, яке необхідно розв'язати:

$$m \cdot x = 0. \quad (6)$$

З урахуванням крайових умов руху (3) отримаємо розв'язок рівняння (6) та знайдемо x , в результаті чого матимемо:

$$x = \frac{8648640 (924 \cdot t^6 - 2772 \cdot t^5 \cdot T + 3150 \cdot t^4 \cdot T^2 - 1680 \cdot t^3 \cdot T^3 + 420 \cdot t^2 \cdot T^4 - 42 \cdot t \cdot T^5 + T^6)v}{T^{13}}. \quad (7)$$

Підставимо вираз (7) у (5), в результаті чого отримаємо:

$$\tilde{I} = \frac{2876883609600 \cdot m \cdot v^2}{T^{14}}. \quad (8)$$

Підставимо вираз (8) у (4), після перетворень отримаємо:

$$K = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[\delta_1 \cdot \left(\frac{F_{м.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_2 \cdot \left(\frac{F_{i.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_3 \cdot \left(\frac{F_{к.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_4 \cdot \left(\frac{T^{14} \cdot x}{5753767219200 \cdot v^2} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2} \rightarrow \min. \quad (9)$$

З математичної моделі (1) визначимо зусилля, що діє в мостовій та кінцевих балках крана і зусилля, що діє на вантаж та підставимо у (9), в результаті чого будемо мати:

$$K = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\delta_1 \left(\frac{g(m+m_3) \cdot \ddot{x} + l \cdot m_3 \cdot x}{g^2 \cdot m} \right)^2 + \delta_2 \cdot \left(\frac{\ddot{x}}{g} \right)^2 + \left(\frac{c_2 \cdot g \cdot W + c_2 \cdot g(m+m_2+m_3) \cdot \ddot{x}}{c_2 \cdot g^2 \cdot m} + \frac{(g \cdot m_2(m+m_3) + c_2 \cdot l \cdot (m_2+m_3)) \cdot x}{c_2 \cdot g^2 \cdot m} + \frac{l \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot x}{c_2 \cdot g^2 \cdot m} \right)^2 + \delta_4 \cdot \left(\frac{T^{14} \cdot x}{5753767219200 \cdot v^2} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Умовою мінімуму критерію (10) є рівняння Ейлера-Пуассона [14]. Для підінтегрального виразу (10) після перетворень отримано лінійне однорідне диференціальне рівняння шістнадцятого порядку:

$$x + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x + A_3 \cdot x + A_4 \cdot x + A_5 \cdot x = 0, \quad (11)$$

де: A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 – постійні коефіцієнти, які визначаються залежностями:

$$A_1 = \frac{3310583721 \ 2740500848 \ 640000 \cdot \delta_3 \cdot l^2 \cdot m_2^2 \cdot m_3^2 \cdot v^4}{c_2^2 \cdot g^4 \cdot \delta_4 \cdot m^2 \cdot T^{28}}; \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{6621167445 \ 2481001692 \ 780000 \cdot \delta_3 \cdot l \cdot m_2 \cdot m_3}{c_2^2 \cdot g^4 \cdot \delta_4 \cdot m^2 \cdot T^{28}} \cdot \frac{(g \cdot m_2(m + m_3) \cdot c_2 \cdot l(m_2 + m_3)) \cdot v^4}{1}; \quad (13)$$

$$A_3 = \frac{3310583721 \ 2740500848 \ 640000 (g^2 \cdot \delta_3 \cdot m_2^2 \cdot (m + m_3)^2 + c_2^2 \cdot l^2(\delta_1 \cdot m_3^2 + \delta_3(m_2 + m_3)^2) + 2 \cdot c_2 \cdot g \cdot \delta_3 \cdot l \cdot m_2(2m_3(m_2 + m_3) + m(m_2 + 2m_3)))v^4}{c_2^2 \cdot g^4 \delta_4 \cdot m^2 \cdot T^{28}}; \quad (14)$$

$$A_4 = \frac{6621167442 \ 5481001697 \ 280000 (g \cdot \delta_3 \cdot m_2 \cdot (m + m_3)(m + m_2 + m_3) + c_2 \cdot l(\delta_1 \cdot m_3(m + m_3) + \delta_3(m_2 + m_3)(m + m_2 + m_3)))v^4}{c_2 \cdot g^3 \cdot \delta_4 \cdot m^2 \cdot T^{28}}; \quad (15)$$

$$A_5 = \frac{3310537212 \ 7405008486 \ 40000 (\delta_2 \cdot m^2 + \delta_1(m + m_3)^2 + \delta_3(m + m_2 + m_3)^2)v^4}{g^2 \cdot \delta_4 \cdot m^2 \cdot T^{28}}. \quad (16)$$

Рівняння (11) аналітично розв'язати не вдається, тому використовуємо метод коллокацій для наближеного розв'язку [15]. У відповідності до методу коллокацій будемо вимагати рівності сформованої нев'язки рівняння Ейлера-Пуассона у моменти часу $\frac{T \cdot k}{5}$ ($k = 1, 2, 3, 4$). Ця вимога математично записується у наступному вигляді:

$$L(x) \Big|_{t=\frac{T \cdot k}{5}}, \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (17)$$

де: L – оператор, який відповідає рівнянню (11).

З урахуванням виразу (17) крайові умови руху механічної системи матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{VI}{x} = 0; \overset{VII}{x} = 0; \\ x\left(\frac{T}{5}\right) = q_1, x\left(\frac{2 \cdot T}{5}\right) = q_2, x\left(\frac{3 \cdot T}{5}\right) = q_3, x\left(\frac{4 \cdot T}{5}\right) = q_4; \\ t = T; x = \frac{V \cdot T}{2}; \dot{x} = V; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{VI}{x} = 0; \overset{VII}{x} = 0. \end{array} \right. \quad (18)$$

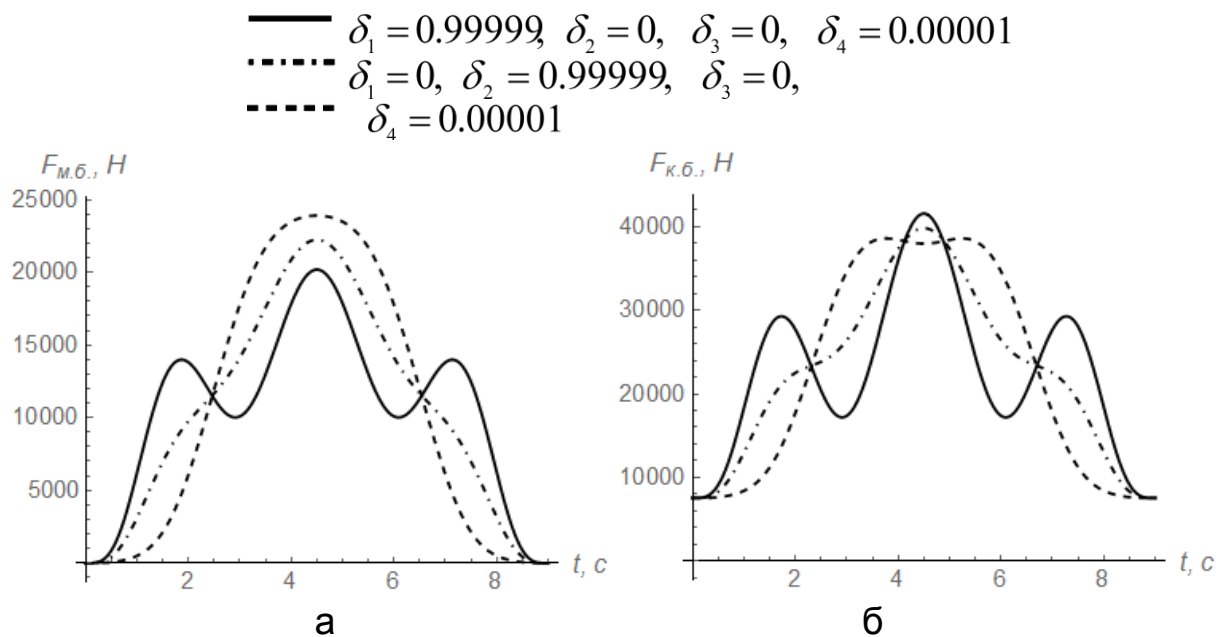


Рис. 2. Перехідний процес пуску механізму переміщення крана: а) зведене зусилля, що діє в мостовій балці крана; б) зведене зусилля, що діє в кінцевих балках крана.

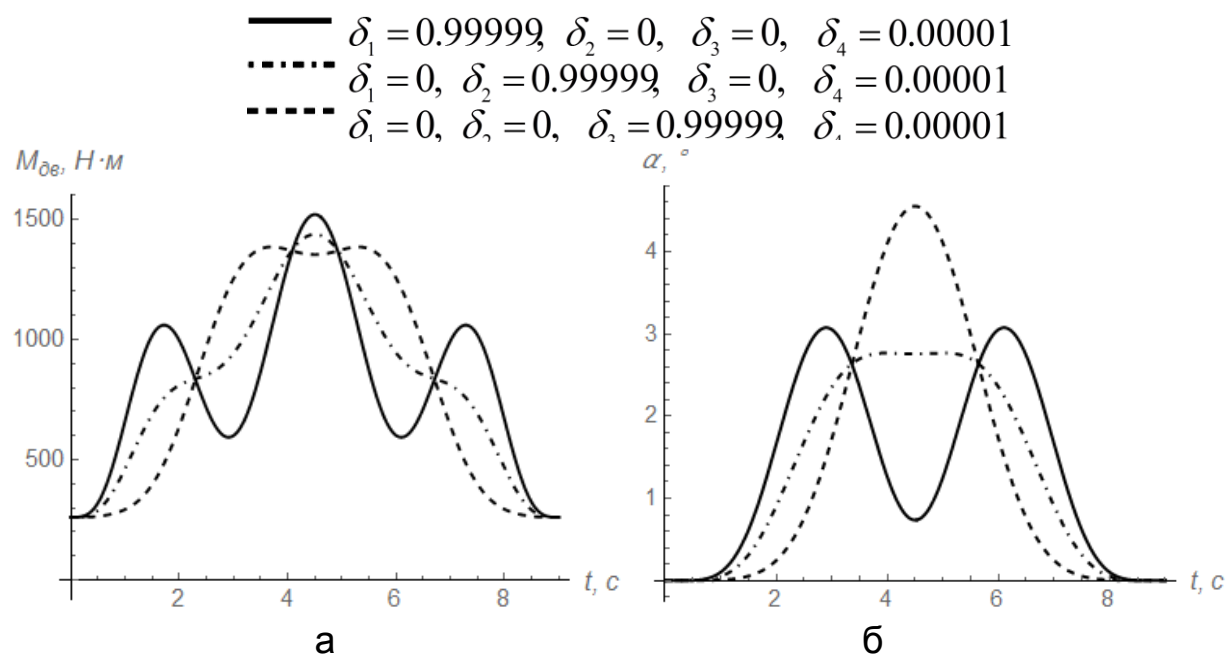


Рис. 3. Перехідний процес пуску механізму переміщення крана: а) момент приводного механізму переміщення крана; б) відхилення вантажного канату від вертикалі.

Щоб дослідити оптимальні режими використовуємо різні значення вагових коефіцієнтів, що входять в критерій (10).

В результаті розв'язку крайової задачі, з урахуванням виразу (18), отримані залежності, що характеризують перехідний процес пуску механізму переміщення крана, вони мають значний об'єм тому

не наводяться. Побудуємо графічні залежності (рис. 2) та (рис. 3) з різними ваговими коефіцієнтами при переміщенні вантажу масою 20 тон, що закріплений на гнучкому підвісі довжиною 7 метрів для крана, параметри якого наведені у [16].

Висновки

У результаті розв'язку оптимізаційної задачі отримано графічні залежності, що відображають зусилля в мостовій (рис. 2,а) та кінцевих балках (рис. 2,б), приводний момент механізму переміщення крана (рис. 3,а) та кут відхилення вантажного канату від вертикалі (рис. 3,б) під час перехідного процесу пуску механізму переміщення крана з різними ваговими коефіцієнтами.

Аналіз графічних залежностей показав, що найкраща плавність наростання приводного моменту механізму переміщення крана, зусиль в мостовій та кінцевих балках досягається при оптимізації перехідного процесу пуску з ваговими коефіцієнтами $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0.99999$ та $\delta_4 = 0.00001$, також при такому керуванні забезпечується найменші пікові значення зусилля в кінцевих балках крана та приводного моменту механізму переміщення крана в порівнянні з розв'язками задач, в яких використовувалися інші вагові коефіцієнти.

Розв'язок задачі з ваговими коефіцієнтами $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0.99999$, $\delta_3 = 0$ та $\delta_4 = 0.00001$ забезпечує мінімальне відхилення вантажного канату від вертикалі. При розв'язку задачі з ваговими коефіцієнтами $\delta_1 = 0.99999$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0$ та $\delta_4 = 0.00001$ пуск механізму переміщення крана супроводжується коливальними процесами, що негативно впливає на металоконструкцію і привід крана. Результати даного дослідження можуть бути використані для розробки системи керування краном на базі мікроконтролера. Використання такої системи дасть можливість зменшити динамічні навантаження на металоконструкції крана, а також зношування приводного механізму. В результаті використання такої системи керування підвищиться надійність і збільшиться строк експлуатації крана.

Список літератури

1. *Найденко Е. В.* Управление электроприводом механизмов горизонтального перемещения с подвешенным грузом. Электромашиностроение та електрообладнання. 2007. № 69. С. 17—22.
2. *Палис Ф., Толочко О. И., Бажутин Д. В.* Гашения горизонтальных упругих колебаний конструкции мостового крана. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Теорія і практика. Тематичний випуск. Кременчук. КрНУ. 2012. №3 (19). С. 336—339.
3. *Беззниченко З. А., Климченкова Н. В., Лагуненков С. В.* Разработка рациональных режимов управления электромеханической системой мостового

крана. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2012. №4 (29). С. 6—11.

4. Герасимьяк Р. П., Найдено Е. В., Тогобицкий А. Л., Лещёв В. А. Динамические нагрузки при оптимальном управлении электроприводом механизма перемещения с подвешенным грузом. Электромашинобудовання та електрообладнання. 2006. Вип. 66. С. 144—146.

5. Дорохов Н. Ю. Перспективы снижения динамических нагрузок на металлоконструкции мостовых кранов с применением волновых цепных передач. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 2. С. 14—20.

6. Слепужніков Є. Д. Визначення динамічних навантажень при пересуванні вантажного візка мостового крана. Машинобудовання. 2015. № 16. С. 34—37.

7. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д., Чернишенко О. В. Динамічні навантаження при пересуванні ходових коліс з гумовими вставками. Машинобудовання. Харків. 2015. Вип. 15. С. 87—91.

8. Debrouwere F. Experimental validation of combined nonlinear optimal control and estimation of an overhead crane [Електронний ресурс] / F. Debrouwere, M. Vukov, R. Quirynen та ін.. Preprints of the 19th world congress the international federation of automatic control cape town, South Africa. 2014. Режим доступу до ресурсу: http://ac.els-cdn.com/S1474667016431356/1-s2.0-S1474667016431356-main.pdf?tid=9018532c-b0b2-11e6-b50a-00000aacb35f&acdnat=1479819345_71b6593420fbf4e501dde027f9a98d02.

9. Liu D. Swing-Free Transporting of Two-Dimensional Overhead Crane Using Sliding Mode Fuzzy Control [Електронний ресурс] / D.Liu, J. Yi, D. Zhao, W. Wang. Proceeding of the American Control Conference, Boston MA, USA. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: <https://pdfs.semanticscholar.org/1cf0/84d5f43e488c5e09b0e6851360bd24402ae1.pdf>.

10. Шишкин Р. В. О выборе величины тормозного момента. SWorld. 2013. Режим доступу до ресурсу: <http://www.sworld.com.ua/konfer30/930.pdf>.

11. Швед Ю. С., Орловский И. А. Управление взаимосвязанным электроприводом передвижения мостового крана. Электротехнические и компьютерные системы. 2013. № 10. С. 7—15.

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

13. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Голдун В. А. Встановлення та аналіз умов усунення коливань елементів динамічної системи "мостовий кран-вантаж". Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. 2012. №10 (2). С. 12—17.

14. Цлаф Л. Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения. Москва. Наука. 1970. 192 с.

15. Черненко В. Д. Высшая математика в примерах и задачах: в 3 т. Т. 2. Санкт-Петербург. Политехника. 2003. 476 с.

16. Будіков Л. Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідійомних кранів мостового типу: монографія. Луганськ. 2003. 210 с.

References

1. Naydenko E. V. (2007). Upravlenie elektroprivodom mehanizmov gorizontalnogo peremescheniya s podveshennyim грузом [Control of the electric drive of

- mechanisms of horizontal movement with the suspended freight]. Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya. 69. 17-22.
2. *Palis F., Tolochko O. I., Bazhutin D. V.* (2012). Gasheniya gorizontalnykh uprugih kolebaniy konstruktzii mostovogo krana [Clearing of horizontal elastic fluctuations of a design of the overhead crane]. Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi. Teoriya i praktika. Tematichniy vipusk. Kremenchuk. KrNU. 3(19). 336-339.
 3. *Beeznichenko Z. A., Klimchenkova N. V., Lagunenkov S. V.* (2012). Razrabotka ratsionalnykh rezhimov upravleniya elektromekhanicheskoy sistemoy mostovogo krana [Development of rational control modes electromechanical system of the overhead crane]. VISNIK DonbaskoYi derzhavnoYi mashinobudivnoYi akademiyi. 4(29). 6-11.
 4. *Gerasimyak R. P., Naydenko E. V., Togobitskiy A. L., Leschyov V. A.* (2006). Dinamicheskie nagruzki pri optimalnom upravlenii elektroprivodom mehanizma peremescheniya s podveshennyim gruzom [Dynamic loadings at optimum control of the movement mechanism electric drive with the suspended freight]. Elektromashinobud. ta elektroobladn. 66. 144-146.
 5. *Dorohov N. Yu.* (2009). Perspektiviyi snizheniya dinamicheskikh nagruzok na metalokonstruktsii mostovykh kranov s primeneniem volnovykh tsepnykh peredach [The prospects of decrease in dynamic loads of a metalwork of overhead cranes with application of wave chain transfers]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2. 14-20.
 6. *Slepuzhnikov Ye. D.* (2015). Vyznachennya dynamichnykh navantazhen pry peresuvanni vantazhnogo vizka mostovogo krana [Determination of dynamic loads when moving trolley overhead crane]. Mashynobuduvannya. 16. 34-37.
 7. *Fidrovs'ka N. M., Slepuzhnikov Ye. D., Chernyshenko O. V.* (2015). Dynamichni navantazhennya pry peresuvanni hodovykh kolis z gumovymy vstavkamy [Dynamic load movement running wheels with rubber inserts]. Mashynobuduvannya : zb. nauk. pr. Ukr. inzh.-ped. akad. Kharkiv. 15. 87-91.
 8. *Experimental validation of combined nonlinear optimal control and estimation of an overhead crane* [Elektronnyi resurs] / [F. Debrouwere, M. Vukov, R. Quirynen ta in.]. Preprints of the 19th world congress the international federation of automatic control cape town, South Africa. 2014. Режим доступу до ресурсу: http://ac.els-cdn.com/S1474667016431356/1-s2.0-S1474667016431356-main.pdf?_tid=-b0b2-11e6-b50a-00000aacb35f&acdnat=1479819345_71b6593420fbf4e501dde027f9a98d02 - Nazva z ekranu.
 9. *Swing-Free Transporting of Two-Dimensional Overhead Crane Using Sliding Mode Fuzzy Control* [Elektronnyi resurs] / D.Liu, J. Yi, D. Zhao, W. Wang. Proceeding of the American Control Conference, Boston MA, USA. 2004. Режим доступу до ресурсу: <https://pdfs.semanticscholar.org/1cf0/84d5f43e488c5e09b0e6851360bd24402ae1.pdf> - Nazva z ekranu.
 10. *Shishkin R. V.* (2013). O vyibore velichiny tormoznogo momenta [About the choice of size of the brake moment]. [Elektronniy resurs] SWorld. Tehnicheskie nauki – mashinovedenie i mashinostroenie. Rezhim dostupu do resursu: <http://www.sworld.com.ua/konfer30/930.pdf>.
 11. *Shved Yu. S., Orlovskiy I. A.* (2013). Upravlenie vzaimosvyazannyim elektroprivodom peredvizheniya mostovogo krana [Control of the interconnected electric drive of movement of the overhead crane]. Elektrotehnicheskie i kompyuternyye sistemy. 10. 7-15.
 12. *Petrenko Yu. N., Alavi S. E., Aleksandrovskiy S. V.* (2011). Issledovanie raboty mostovogo krana s kontrollerom nechetkoy logiki na osnove trehmernoy imitatsionnoy modeli [Research of operation of the bridge easel with the controller of

- a fuzzy logic on the basis of a three-dimensional simulation model]. Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. 3. 20-25.
13. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Holdun V. A. (2012) Vstanovlennia ta analiz umov usunennia kolyvan elementiv dynamichnoi systemy "mostovyi kran-vantazh" [Definition and analysis of conditions eliminate oscillation elements dynamic system "overhead crane-load"]. Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Serii : Tekhnichni nauky. 10(2). 12-17.
14. Tslaf L. Ya. (1970). Variatsionnoe ischislenie i integralnyie uravneniya [Calculus of variations and integrated equations]. Moscow. Nauka. 192.
15. Chernenko V. D. (2003). Vysshaya matematika v primerah i zadachah [The higher mathematics in examples and tasks]. SPb. Politehnika. 476.
16. Budikov L. Ia. (2003). Bahatoparametrychnyi analiz dynamiky vantazhopidionnykh kraniv mostovoho typu [Multiparameter analysis of the dynamics of cranes overhead type]. Monohrafiia. Luhansk. 2. 210.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА

В. С. Ловеikin, В. В. Крушельницкий

Аннотация. *Данная работа посвящена оптимальным режимам управления механизмом перемещения мостового крана, при которых динамические нагрузки в металлоконструкции и приводе сводятся к минимуму. Уменьшение этих негативных факторов повышает производительность и надежность крана в целом. Поставленная задача является достаточно актуальной и требует более глубокого изучения, решение которой заключается в том, чтобы разогнать привод механизма перемещения крана на стадии пуска в таком режиме, который позволит системе двигаться плавно без дополнительных резких колебаний. Исследования выполнены с использованием четырехмассовой динамической модели крана и системы дифференциальных уравнений, описывающих ее движение. Для оптимизации переходного процесса пуска механизма перемещения крана использован комплексный критерий, в который входят четыре составляющих. В результате решения дифференциального уравнения методом коллокации с различными вариациями весовых коэффициентов получены оптимальные режимы управления, которые представлены в виде графических зависимостей, характеризующих процесс пуска механизма перемещения крана, анализ которых показал, что при перемещении груза краном динамические нагрузки в металлоконструкции и приводе сводятся к минимуму. Следует отметить, что после окончания переходного процесса пуска, колебания груза отсутствуют. Теоретические исследования выполнялись для крана мостового типа грузоподъемностью 20 тонн. Полученные режимы можно использовать для разработки*

системы управления мостового крана на базе микроконтроллера. Использование такой системы позволяет уменьшить динамические нагрузки, возникающие в металлоконструкции и приводном механизме, при перемещении груза краном.

Ключевые слова: мостовой кран, привод, пуск, динамическая модель, математическая модель, режимы движения, механизм перемещения, динамические нагрузки, анализ

OPTIMUM CONTROL MODES FOR MOVEMENT MECHANISM OF BRIDGE CRANE

V. S. Loveikin, V. V. Krushelnitsky

Abstract. *This work is devoted to optimum control modes by the mechanism of movement of the overhead crane at which dynamic loadings in a metal construction and the drive are minimized. Reduction of these negative factors increases productivity and reliability of the crane in general. The objective is rather urgent and demands deeper studying which decision is in accelerating the drive of the mechanism of movement of the crane at a start-up stage in such mode which will allow system to move smoothly without additional sharp fluctuations. Researches are executed with use of a four-mass of dynamic model of the crane and system of the differential equations describing her movement. For optimization of transition process of launch of the mechanism of movement of the crane the complex criterion which four components enter is used. As a result of the solution of the differential equation the collocation method with various variations of weight coefficients has received optimum control modes which are presented in the form of the graphic dependences characterizing process of launch the movement mechanism of the crane which analysis has shown that moving freight by the crane dynamic loadings in a metal construction and the drive are minimized. It should be noted that after the end of transition process of start-up, there is no fluctuation of freight. Theoretical researches were carried out for the crane of bridge type with a loading capacity of 20 tons. The received modes can be used for development of the control system the bridge crane on the basis of the microcontroller. Use of such system will allow to reduce the dynamic loadings arising in a metal construction and the driving mechanism when moving freight by the crane.*

Key words: *bridge crane, drive, start-up, dynamic model, mathematical model, modes of movement, movement mechanism, dynamic loadings, analysis*