

**ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
НА МЕТАЛОКОНСТРУЦІЇ ПРОЛЬОТНИХ КРАНІВ ШЛЯХОМ
ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПУСКУ КРАНА
ЗА КОМПЛЕКСНИМ КРИТЕРІЄМ**

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук

В. В. Крушельницький, аспірант*

e-mail: lovvs@ukr.net

Анотація. *В роботі вирішена задача оптимізації перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана. В якості оптимізаційного критерію використано комплексний інтегральний критерій, який включає в себе середньоквадратичне значення функції зусилля, що діє в мості крана та середньоквадратичне значення функції зусиль від коливань вантажу. Для синтезу оптимального закону руху перехідного режиму пуску крана використана тримасова динамічна модель крана, на основі якої отримано систему диференціальних рівнянь руху крана. Оптимальний режим руху крана отриманий внаслідок розв'язку диференціального рівняння шістнадцятого порядку методом коллокацій. Результати оптимізації проілюстровані графіками швидкості і рушійного зусилля кінцевих балок та фазовими портретами коливань вантажу і пружного зусилля, яке виникає у мостовій балці. В результаті проведеної оптимізації після закінчення перехідного процесу пуску крана за оптимальним законом коливальні процеси відсутні, а під час самого процесу пуску крана відхилення вантажу не перевищує 0,14 м при довжині каната 3 м. Синтезовані оптимальні закони руху можуть бути використані для розробки системи керування мостовим краном на базі мікроконтролера та частотного перетворювача, яка буде працювати в режимі реального часу. Використання такої системи дасть можливість значно зменшити коливання вантажу на гнучкому підвісі та динамічні навантаження, що діють на металоконструкції крана, і як наслідок, підвищується надійність роботи крана, зменшуються енерговитрати приводних механізмів та підвищується продуктивність і безпечність експлуатації крана.*

Ключові слова: *кран, динамічні навантаження, динамічна модель, математична модель, приведена маса, балка крана, оптимізація, комплексний критерій*

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

© В. С. Ловейкін, В. В. Крушельницький, 2016

Постановка проблеми. Під час переміщення вантажу прольотним краном металоконструкції та кранові механізми, піддаються динамічним навантаженням, які зумовлені коливаннями вантажу, що передаються на мостову балку крана. Такі процеси супроводжуються підвищеною витратою електроенергії, вони зменшують надійність крана та призводять до передчасного виходу із ладу кранових механізмів. Внаслідок цього виникає необхідність у додаткових матеріальних витратах на ремонт та обслуговування крана. Тому при роботі вантажопідйомних машин необхідно уникати небажаних факторів, які викликані динамічними навантаженнями в металоконструкціях.

Аналіз останніх досліджень. Компанією Schneider Electric [1] для механізмів горизонтального переміщення з метою зменшення динамічних навантажень на металоконструкції і механізми електроприводів запропоновано обмежити прискорення під час процесу пуску/гальмування та накладати гальма при швидкостях близьких до нуля. Також запропоновано використовувати крановий привід з асинхронним двигуном і короткозамкненим ротором при живленні від частотного перетворювача. Автори роботи [2] запропонували оптимізацією методом покоординатного спуску, суть якого полягає в почерговій зміні положень вузлів інтерполяції на певний крок від початкового положення. Варіант, при якому відхилення вантажу є мінімальними, визнається раціональним. Автори роботи [3] запропоновали алгоритм керування електроприводом підйому кранового механізму, який забезпечує автоматичне обмеження динамічних навантажень при максимально можливій швидкодії в рамках невизначеності по відношенню до маси вантажу з виключенням коливальної складової перехідного процесу. В роботі [4] запропоновано зменшити динамічні навантаження на конструкцію крана за рахунок розрахованих оптимальних гальмівних характеристик. У якості оптимізаційного критерію використано узагальнену функцію бажаності Харрінгтона. В роботі [5] досліджувались кінцеві умови, за якими коливання елементів мостового крана і вантажу закріпленого на гнучкому підвісі усуваються до кінця перехідного процесу за рахунок зменшення тривалості коливань у елементах крана. В роботі виконана оптимізація перехідного процесу руху крана за критерієм середньоквадратичного відхилення рушійного зусилля. В роботі [6] запропоновано застосовувати систему обмеження перекосу моста шляхом порівняння переміщень опор моста та систему обмеження перекосу моста на основі визначення положення опори моста відносно підкранової колії за допомогою фазі-регулятора. В роботі [7] здійснено гасіння горизонтальних пружних коливань конструкцій

мостового крана за рахунок синтезу модального регулятора. При дослідженні використовувалася двомасова динамічна модель та пакет Comsol Multiphysics. Спираючись на вище вказані дослідження пропонується зменшити динамічні зусилля, що діють на кранову балку шляхом оптимізації процес пуску за комплексним критерієм, до якого входять власні коливання вантажу та пружне зусилля, яке виникає у мостовій балці крана.

Мета досліджень. Метою даної роботи є вирішення задачі зменшення динамічних навантажень які виникають у крановому мості під час руху механізму переміщення прольотного крану шляхом оптимізації процесу пуску за комплексним критерієм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: виконати постановку оптимізаційної задачі; розв'язати оптимізаційну задачу; проаналізувати отримані результати.

Результати досліджень. Для проведення дослідження використано тримасову динамічну модель мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі (рис. 1) [8].

На рис. 1 зображено приведені маси m_0 , m_1 , m відповідно приводу і кінцевих балок, кранового візка і балки, а також вантажу. Маса приводу і кінцевих балок з'єднана з приведеною масою кранового візка та балкою крана пружним елементом з жорсткістю c . До маси приводу і кінцевих балок прикладено рушійне зусилля F_p та сила опору переміщення балки крана W . В цій моделі x , x_0 , x_1 узагальнені координати центрів мас вантажу, приводу і кінцевих балок, кранового візка і балки відповідно, а l – довжина гнучкого підвісу вантажу. Динамічна модель (рис. 1) описується наступною системою диференціальних рівнянь руху [8] (крапка над символом означає диференціювання за часом):

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 = F_p - W - c(x_0 - x_1); \\ m_1 \ddot{x}_1 = c(x_0 - x_1) - \frac{mg}{l}(x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l}(x_1 - x). \end{cases} \quad (1)$$

Функція внутрішнього зусилля, що діє на міст крана, описується таким виразом:

$$F_m = c(x_0 - x_1). \quad (2)$$

Функція зусиль, що виникають від коливань вантажу має вигляд:

$$F_g = \frac{mg}{l}(x_1 - x). \quad (3)$$

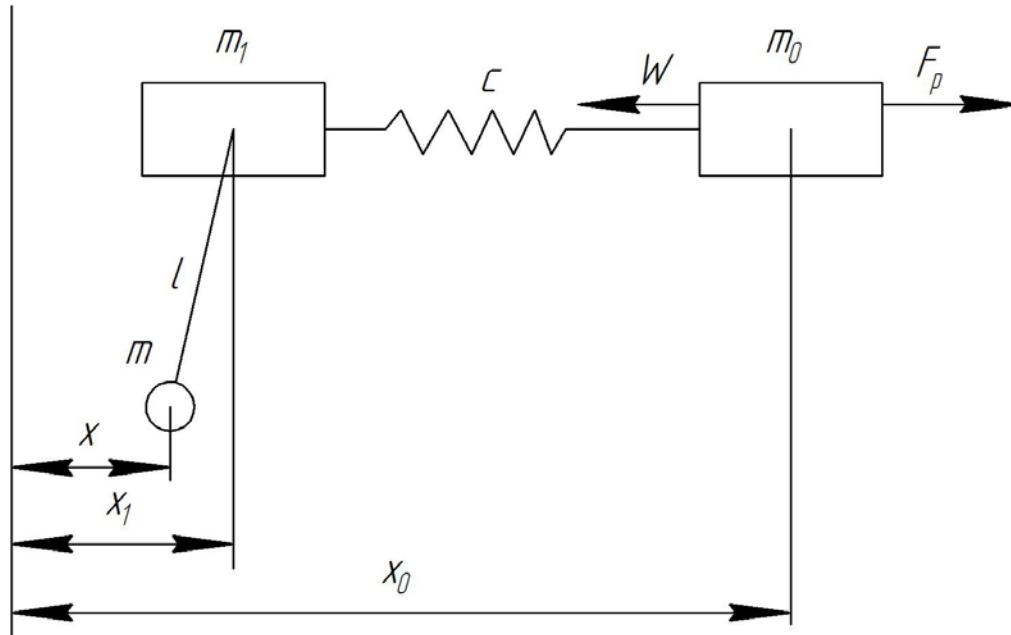


Рис. 1. Тримасова динамічна модель мостового крана.

Для визначення залежностей переміщення, швидкості та прискорення зведеної маси мостової балки використовуємо систему диференціальних рівнянь (1):

$$x_1 = x + \frac{l}{g} \ddot{x}, \quad (4)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + \frac{l}{g} \ddot{x}, \quad (5)$$

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x} + \frac{l}{g} \overset{IV}{x}. \quad (6)$$

Для кінцевих балок:

$$x_0 = m_1 \frac{l}{cg} \overset{IV}{x} + \left(\frac{m + m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \ddot{x} + x = x + \left(\frac{m + m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \ddot{x} + \frac{m_1 l}{cg} \overset{IV}{x}, \quad (7)$$

$$\dot{x}_0 = \dot{x} + \left(\frac{m + m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \ddot{x} + \frac{m_1 l}{cg} \overset{V}{x}, \quad (8)$$

$$\ddot{x}_0 = \ddot{x} + \left(\frac{m + m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \overset{IV}{x} + \frac{m_1 l}{cg} \overset{VI}{x}. \quad (9)$$

Для реалізації закону переміщення кінцевих балок з урахуванням виразу (8) крайові умови матимуть вигляд:

$$\begin{cases} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{x} = 0; \overset{V}{x} = 0; \\ t = t_1; x = \frac{Vt_1}{2}; \dot{x} = V; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{x} = 0; \overset{V}{x} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

де: t – час; t_1 – тривалість пуску; V – устелена швидкість мостової балки.

У якості оптимізаційного критерію використаємо комплексний критерій, в який входять середньоквадратичне значення функції зусилля (2), що діє в мості крана та середньоквадратичне значення функції зусиль від власних коливань вантажу (3). Такий критерій являє собою інтегральний функціонал, який необхідно мінімізувати:

$$I_{\dot{F}} = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} [\delta_1 (c(x_0 - x_1))^2 + \delta_2 \left(\frac{mg}{l} (x_1 - x) \right)^2] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Тут δ_1 і δ_2 – вагові коефіцієнти, які визначають квадратичні значення зусилля в мостовій балці і від коливань вантажу відповідно. Підставимо у вираз (11) вирази (4) і (7), в результаті чого будемо мати.

$$I_{\dot{F}} = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[\delta_1 \left(c \left(\left(x + \left(\frac{m+m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \cdot \ddot{x} + \frac{m_1 \cdot l}{c \cdot g} \cdot x \right) - \left(x + \frac{l}{g} \cdot \ddot{x} \right) \right) \right)^2 + \delta_2 \left(\frac{m \cdot g}{l} \left(\left(x + \frac{l}{g} \cdot \ddot{x} \right) - x \right) \right)^2 \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Умовою мінімуму критерію (12) є рівняння Ейлера-Пуасона [9]:

$$\sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{d^i \partial f}{dt^i \partial x^{(i)}} = 0, \quad i = 0, \dots, n. \quad (13)$$

Після підстановки підінтегрального виразу з (12) в рівняння (13) отримаємо:

$$g \cdot ((m + m_1)^2 \cdot \delta_1 + m^2 \cdot \delta_2) \cdot x + 2 \cdot l \cdot m_1 \cdot \overset{IV}{x} \cdot (m + m_1) \cdot \delta_1 \cdot x + \frac{l^2 \cdot m_1^2 \cdot \delta_1 \cdot \overset{VIII}{x}}{g} = 0. \quad (14)$$

Рівняння (14) не забезпечує крайові умови (10), тому в критерій (12) вносимо додаткову складову $\overset{IV}{x}$ з незначним ваговим коефіцієнтом:

$$I_{\dot{F}} = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[\delta_1 \left(c \left(\left(x + \left(\frac{m+m_1}{c} + \frac{l}{g} \right) \cdot \ddot{x} + \frac{m_1 \cdot l}{c \cdot g} \cdot x \right) - \left(x + \frac{l}{g} \cdot \ddot{x} \right) \right) \right)^2 + \delta_2 \left(\frac{m \cdot g}{l} \left(\left(x + \frac{l}{g} \cdot \ddot{x} \right) - x \right) \right)^2 + (1 - \delta_1 + \delta_2) \overset{IV}{x}^2 \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Тоді рівняння Ейлера-Пуасона для функціонала (15) після перетворень матиме вигляд:

$$\overset{XVI}{x} + A_1 \overset{VIII}{x} + A_2 \overset{VI}{x} + A_3 \overset{IV}{x} = 0. \quad (16)$$

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

$$A_1 = \frac{l^2 \cdot m_1^2 \cdot \delta_1}{g^2 (\delta_1 + \delta_2 - 1)}, \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{2 \cdot l \cdot m_1 (m + m_1) \cdot \delta_1}{g \cdot (\delta_1 + \delta_2 - 1)}, \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{(1 - \delta_1 - \delta_2) \cdot ((m + m_1)^2 \cdot \delta_1 + m^2 \cdot \delta_2)}{(\delta_1 + \delta_2 - 1)^2}. \quad (19)$$

Рівняння (16) аналітично розв'язати не вдається, тому використовуємо метод коллокацій для наближеного розв'язку [10].

У відповідності до методу коллокацій будемо вимагати рівності сформованої нев'язки рівняння Ейлера-Пуассона у моменти часу $\frac{t_1 \cdot k}{5}$ ($k = 1, 2, 3, 4$).

Ця вимога математично записується у вигляді системи алгебраїчних рівнянь:

$$L(x)|_{t=\frac{t_1 \cdot k}{5}}, \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (20)$$

де: L – оператор, який відповідає рівнянню (16).

Оптимізація проводилась з використанням крайових умов (10) виразів (4)–(9) та наступних параметрів: $m=3200 \text{ кг}$; $m_0=546 \text{ кг}$; $l=3 \text{ м}$; $m_1=669 \text{ кг}$; $c=69 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$; $g=9.81 \text{ м/с}^2$; $V=0.7 \text{ м/с}$; $t_1=3 \text{ с}$; $W=596 \text{ Н}$; $\delta_1=0.399$; $\delta_2=0.6$.

Для отриманого наближеного розв'язку оптимізаційної задачі побудуємо графіки, які характеризують перехідний процес пуску прольотного крана, а саме графіки швидкості та рушійного зусилля кінцевих балок (рис. 2).

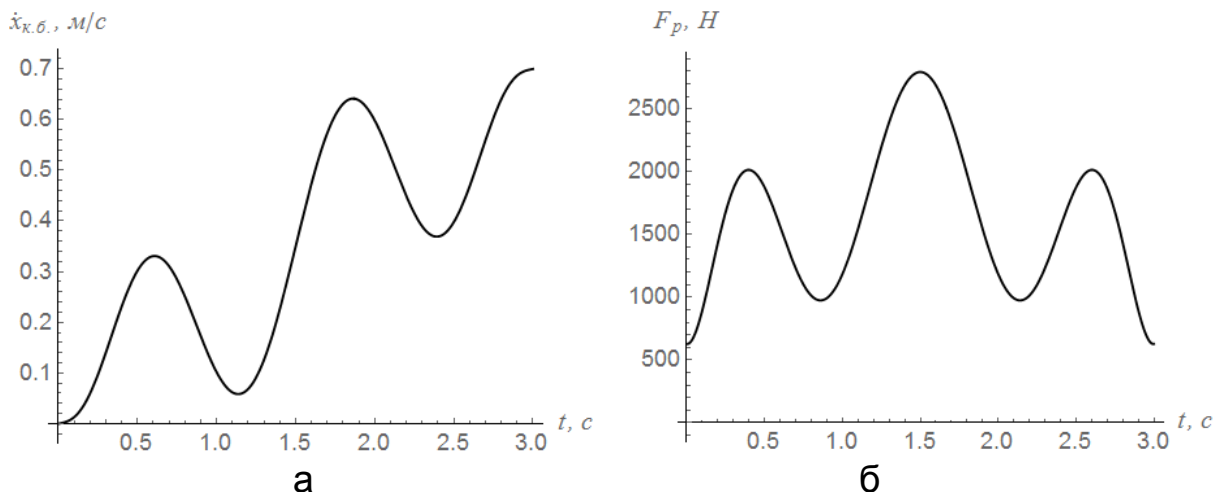


Рис. 2. Графік зміни: а) швидкості кінцевих балок крана; б) рушійного зусилля.

Для оцінки коливальних процесів та динамічних навантажень на металоконструкцію при оптимальному режимі руху крана побудуємо фазові портрети коливань вантажу та пружного зусилля в мостовій балці крана (рис. 3).

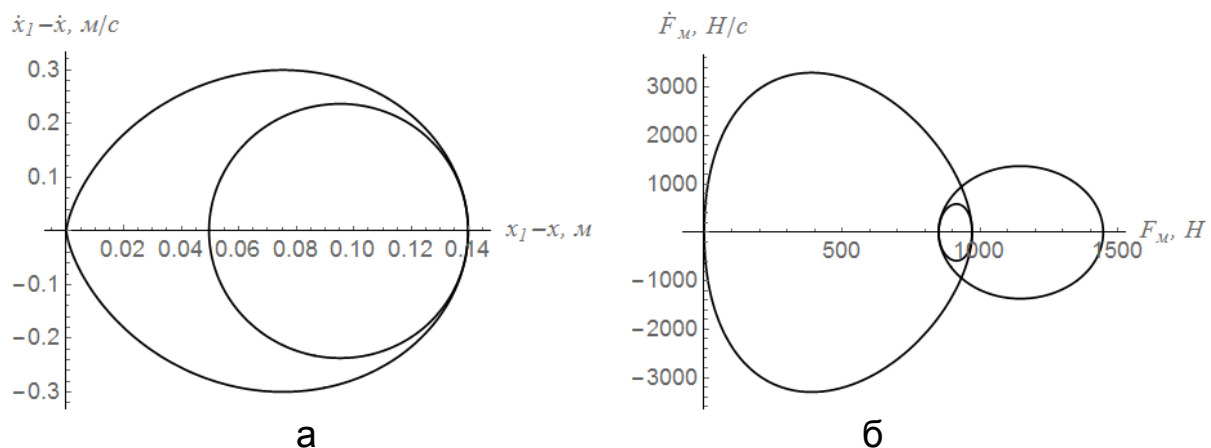


Рис. 3. Фазові портрети коливань: а) вантажу; б) пружного зусилля в мостовій балці крана.

Висновок. На основі математичної моделі динаміки руху мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі здійснено оптимізацію режиму пуску за комплексним критерієм. Розв'язок варіаційної задачі отримано наближеним методом. Розгін крана за отриманим законом швидкості переміщення кінцевих балок дає змогу зменшити коливання зусилля в мостовій балці крана, а також коливання вантажу відносно моста. Слід відмітити, що після закінчення процесу пуску коливальні процеси відсутні.

Список літератури

1. Попов Е. В. Техническая коллекция Schneider Electric "Проектирование электроприводов крановых механизмов" [Електронний ресурс] / Евгений Владимирович Попов. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: http://www.opsecat.schneider-electric.com/cut.CatalogueRetrieverServlet/CatalogueRetrieverServlet?fct=get_element&env=publish&scp_id=Z009&el_typ=rendition&cat_id=DESIGNER_RUSSIA&maj_v=1&min_v=8&nod_id=0000000003&doc_id=H397208&frm=pdf&usg=&dwnl=true.
2. Хиценко Н. В. Оптимизация переходных режимов движения грузовой тележки пролетного крана / Н. В. Хиценко, А. И. Хиценко, С. Р. Бежин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 2. – С. 280–286.
3. Завьялов З. М. Автоматическое ограничение динамических нагрузок электропривода подъема мостового крана / З. М. Завьялов, В. В. Гусев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – С. 151–154.
4. Будиков Л. Я. Метод расчета оптимальных тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов / Л. Я. Будиков, Р. В. Шишкин // Наукові вісті Дніпровського університету, Авторські статті співробітників СХУ ім. В. Даля. – 2012. – №7. – С. 89.
5. Ловейкін В. С. Встановлення та аналіз умов усунення коливань елементів динамічної системи «мостовий кран вантаж» / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, В. А. Голдун // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2012. – №10, т. 2 (59). – С. 12–17.
6. Щедринов А. В. Исследование работы систем ограничения перегиба моста и систем демпфирования колебаний груза мостовых кранов / А. В. Щедринов,

- А. А. Коврыжкин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – №3. – С. 52–55.
7. Толочко О. И. Гашение горизонтальных упругих колебаний конструкции мостового крана / О. И. Толочко, Д. В. Бажутин, П. Палис // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3. – С. 336–339.
8. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины / В. Ф. Гайдамака. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
9. Цлаф Л. Я. / Вариационное исчисление и интегральные уравнения / Л. Я. Цлаф. – М.: Наука, 1970. – С. 92–94.
10. Черненко В. Д. Высшая математика в примерах и задачах: в 3 т. Т. 2 / В. Д. Черненко. – СПб.: Политехника, 2003. – 476 с.

References

1. Попов, Е. В. (2009). Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric "Proektirovaniye elektropriyvodov kranovikh mekhanizmov" [Elektronnyy resurs] [Technical collection of Schneider Electric. Design of electric drives of crane mechanisms : electronic resource]. Evheniy Vladymyrovych Popov. Rezhym dostupu do resursu: http://www.ops-ecat.schneider-electric.com/cut.CatalogueRetrieverServlet/CatalogueRetrieverServlet?fct=get_element&env=publish&scp_id=Z009&el_typ=rendition&cat_id=DESIGNER_RUSSIA&maj_v=1&min_v=8&nod_id=0000000003&doc_id=H397208&frm=pdf&usg=&dwnl=true.
2. Khytsenko, N. V., Khytsenko, A. Y., Bezdyn, S. R. (2013). Optymyzatsyya perekhodnykh rezhymov dvizhenyya hruzovoy telezhky proletnoho kрана [Optimization of transitional modes of movement of cargo best deals, best price span of the crane]. Cientific papers of Donetsk national technical University. Ser.: Mountain-Electromechanical, Vyp. 2, 280–286.
3. Zav'yalov, Z. M., Husev V. V. (2011). Avtomatycheskoe ohranychenye dynamicheskikh nahruzok elektropriyoda podema mostovoho kрана [Automatic limitation of dynamic loads of electric hoist bridge crane]. Proceedings of Tomsk Polytechnic University, 151–154.
4. Budykov, L. Ya., Shyshkyn, R. V. (2012). Metod rascheta optymal'nykh tormoznykh kharakterystyk mekha-nizmov peredvizhenyya hruzopodemnykh kранов [Calculation method of optimum braking of the mechanisms of movement of cranes]. Cientific papers of Donetsk National Technical University. Ser.: Mountain-Electromechanical, 7, 89.
5. Loveykin, V. S., Romasevych, Yu. O., Holdun, V. A. (2012). Vstanovlennyya ta analiz umov usunennyya kolyvan' elementiv dynamichnoyi systemy «mostovyy kран vantazh» [Finding and analysis of conditions of elimination of fluctuations of elements of a dynamical system "bridge crane cargo"]. Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University, 10, t. 2 (59), 12–17.
6. Shchedrynov, A. V., Kovrizhyn, A. A. (2010). Ysledovanyie raboti system ohranychenyya perekosa mosta y system dempfyrovanyia kolebanyia hruza mostovykh kранов [Research of the systems limitations of a skewed bridge and the system damping oscillations of the load bridge cranes]. Electrical complexes and systems of control, 3, 52–55.
7. Tolochko, O. Y., Bazhutyn, D. V., Palys, P. (2012). Hashenyye horizontal'nykh upruhykh kolebanyia konstruktsiy mostovoho kрана [The horizontal damping of elastic vibrations of the bridge crane structures]. Electrical and energy saving systems, 3, 336–339.
8. Haydamaka, V. F. (1989). Lifting machines. K.: Vishcha shkola, 328.
9. Tslaf, L. Ya. (1970). Calculus of variations and integral equations. M.: Nauka, 92–94.
10. Chernenko, V. D. (2003). Higher mathematics examples and problems: v 3 t. T. 2. SPb.: Polytekhnyka, 476.

УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА МЕТАЛОКОНСТРУЦИИ ПРОЛЕТНЫХ КРАНОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПУСКА КРАНА ПО КОМПЛЕКСНЫМ КРИТЕРИЕМ

В. С. Ловейкин, В. В. Крушельницкий

Аннотация. В работе решена задача оптимизации переходного процесса пуска механизма перемещения мостового крана. В качестве оптимизационного критерия использован комплексный интегральный критерий, который включает в себя среднеквадратическое значение функции усилия, действующее в мосту крана и среднеквадратическое значение функции усилий от колебаний груза. Для синтеза оптимального закона движения переходного режима пуска крана использована трёхмассовая динамическая модель крана, на основе которой получена система дифференциальных уравнений движения крана. Оптимальный режим движения крана полученный в результате решения дифференциального уравнения шестнадцатого порядка методом коллокации. Результаты оптимизации проиллюстрированы графиками скорости и движущего усилия концевых балок и фазовыми портретами колебаний груза и упругого усилия, возникающего в мостовой балке. В результате проведенной оптимизации после окончания переходного процесса пуска крана по оптимальным законом колебательные процессы отсутствуют, а во время самого процесса пуска крана отклонения груза не превышает 0,14 м при длине каната 3 м. Синтезированные оптимальные законы движения могут быть использованы для разработки системы управления мостовым краном на базе микроконтроллера и частотного преобразователя, которая будет работать в режиме реального времени. Использование такой системы позволит значительно уменьшить колебания груза на гибком подвесе и динамические нагрузки, действующие на металлоконструкции крана, и как следствие, повышается надежность работы крана, уменьшаются энергозатраты приводных механизмов и повышается производительность и безопасность эксплуатации крана.

Ключевые слова: кран, тележка, динамические нагрузки, динамическая модель, математическая модель, приведенная масса, балка крана, оптимизация

REDUCTION OF DYNAMIC LOADS ON METAL CONSTRUCTION SPAN CRANES BY OPTIMIZING TRANSITION PROCESS OF START-UP OF CRANE ON COMPLEX CRITERIA

V. S. Loveikin, V. V. Krushelnitsky

Abstract. In work, the task optimization transition process of launch the mechanism movement of the bridge crane is solved. As

optimization criterion, the complex integrated criterion that includes average value of function the effort operating in the bridge of the crane and average value of function efforts from fluctuations of freight is used. For synthesis of the optimum law of movement of the transitional mode of launch of the crane, the three mass dynamic model of the crane on the basis of which the system of the differential equations movement of the crane is received is used.

The optimum mode of movement of the crane received as a result of the solution of the differential equation of the sixteenth order by a collocation method. Results of optimization are illustrated with schedules of speed and driving effort of trailer beams and phase portraits of fluctuations of the freight and elastic effort arising in a bridge beam. As a result of the performed optimization after the end of transition process of launch of the crane on the optimum law oscillatory processes are absent, and during the process of launch of the crane of a deviation of freight doesn't exceed 0,14 m with a length rope of 3 m.

The synthesized optimum laws of movement can be used for development of the system of control of the bridge crane based on the microcontroller and the frequency converter that will work in real time. Use of such system will allow reducing considerably fluctuations of freight on a flexible suspension and the dynamic loads operating on a crane metal construction, and as a result, reliability of operation of the crane increases, energy costs of driving mechanisms decrease and performance and safety of operation of the crane increases.

Keywords: crane, dynamic loadings, dynamic model, mathematical model, reduced weight, crane beam, optimization, complex criterion

УДК 631.33.02

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИСІВУ НАСІННЯ ПНЕВМОМЕХАНІЧНИМ ВИСІВНИМ АПАРАТОМ З ПЕРИФЕРІЙНИМ РОЗТАШУВАННЯМ КОМІРОК ТА ІНЕРЦІЙНИМ ВИДАЛЕННЯМ ЗАЙВОГО НАСІННЯ

**К. В. Васильковська, О. М. Васильковський, М. М. Петренко,
кандидати технічних наук
Кіровоградський національний технічний університет
e-mail: vasilkovskakv@ukr.net**

Анотація. Проведена серія досліджень пневмомеханічного висівного апарата з периферійним розташуванням комірок на

© К. В. Васильковська, О. М. Васильковський, М. М. Петренко, 2016