

*the warmed bottom of tub of brazier. The equation considers design features of a mixer, frequency of rotation of blades, their length and the physical characteristic crushed seeds the friction expressed through factors. The equation decision allows to define speed of movement of a particle in a direction of a shovel and district speed, movement time on the blade. It is initial data for axial movement crushed seeds. Passage time crushed seeds on the mixer blade allows to prove modes conductive warmly – moisture exchange. Passage time on a tub axis allows to prove modes convective warmly – moisture exchange.*

*However movement of particles on free shovel differs from movement of particles in turbulent mixer vats braziers. In space described by rotating mixer, the strongest consolidation of lines of current is observed, therefore it is possible to assume, that in this zone there will be the most intensive hashing of a liquid. In device volume two zones – mixer zone in which there is intensive hashing, and circulation zone in which hashing occurs to smaller speeds are allocated. For carrying out of analysis of hydrodynamic problems connected with movement crushed seeds in vats to brazier through volume between shovels of space of rotor of mixer, it was used by theory of vortical pumps.*

**Key words:** *turbine mixer, hashing hydrodynamics, district (peripheral) circulation, radially-axial circulation, multival brazier, modelling*

УДК 621.87

## **ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНА З УРАХУВАННЯМ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА**

***В. С. Ловейкін, доктор технічних наук***

***В. В. Крушельницький, здобувач\****

***e-mail: lovvs@ukr.net***

**Анотація.** *У роботі проведений динамічний аналіз руху мостового крана для перехідного процесу пуску механізму переміщення мостової балки, руху на усталеній швидкості, процесу гальмування та залишкових коливань. Для отримання графічних залежностей, що характеризують досліджувані режими,*

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

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

*використана чотиримасова динамічна модель та її математична модель, яка є багатоетапною і кожен етап описується системою своїх диференціальних рівнянь. Крім того, записані початкові та кінцеві умови руху окремих мас. Динамічний аналіз виконувався з урахуванням нелінійності моменту приводного двигуна, який змінювався за формулою Клосса. Теоретичні дослідження виконувалися для крана вантажопідйомністю 20 тон з використанням методу чисельного інтегрування диференціальних рівнянь. Виявлено, що металокопструкція піддається динамічним навантаженням протягом всього процесу переміщення, а також після зупинки крана. Найбільші навантаження виникають саме під час пуску приводного механізму переміщення мостової балки. Отримані результати даної роботи можна використати для пошуку раціонального рішення, яке дасть змогу зменшити динамічні навантаження, що виникають у металокопструкції та приводному механізмі переміщення крана шляхом оптимізації режимів керування.*

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

**Постановка проблеми.** Крани мостового типу широко використовуються у машинобудівних цехах, на підприємствах військово-промислового комплексу, гірничодобувних комбінатах, цехах металургійних комплексів, тепло- і гідроелектростанціях, на складах логістичних центрів тощо. Переміщення вантажу мостовим краном супроводжується небажаними процесами, які приводять до виникнення динамічних навантажень у приводі та металокопструкції, що зумовлені зростанням швидкостей робочих рухів. Таким чином, зменшується продуктивність крану, його надійність і, як наслідок, підвищується можливість виникнення під час роботи аварійних ситуацій. З метою оцінки та подальшого усунення цих негативних факторів необхідно виконати динамічний аналіз переміщення крана під час перехідного процесу пуску механізму переміщення крана, руху на усталеній швидкості, процесу гальмування та визначити залишкові коливання після зупинки крана, що дасть можливість встановити закономірності зміни динамічних навантажень в металокопструкціях та приводних механізмах.

**Аналіз останніх досліджень.** Для дослідження ударних навантажень при русі крана по рейковому шляху автори роботи [1] використали восьмимасову динамічну модель мостового крана та рівняння Лагранжа другого роду, визначили функції динамічної сили в буксах кранових коліс і основних металокопструкціях моста

мостового крана. В моделі крана враховано жорсткість канату, моста крана та підшипників букс кранових коліс. В роботі [2] запропоновано математичну модель та алгоритм розрахунку вільних і вимушених коливань складеної металокопструкції мостового крана. В результаті визначення частот і форм вільних та амплітуд вимушених коливань мостової копструкції свідчать про істотний вплив на характеристики динамічних процесів не лише пружно-інерційних параметрів механічної системи, а й положення каретки з підймальним механізмом на мості крана. В роботі [3] проведено аналіз впливу процесу гальмування козлового крана на напружений стан його металокопструкції. Запропоновано розрахункові схеми навантажень при лінійному і діагональному розташуванні приводів. Визначенно зміну навантажень в залежності від нерівномірності гальмівних моментів. Виявлено, що найбільш напруженими вузлами металокопструкції є місця закріплення опор з крановою балкою. Автори роботи [4] запропонували методику визначення навантажень і діють на несучу металокопструкцію, що виникають від перекоосу опор козлового крана. Автори роботи [5] провели динамічний аналіз для порталного крана з використанням одно-, дво- та тримасової динамічних моделей. Для побудови математичної моделі використовувався метод кінцевих елементів. В роботі [6] використовували семимасову динамічну модель та цифрову схему (пакет MATLAB/Simulink) механізму переміщення мостового крана, отримали графіки перехідних процесів пружної сили в поздовжній балці та поперечній балці, графіки швидкостей коліс, зміни відносних переміщень вантажу і сторін крана. Автор роботи [7] виконав динамічний аналіз навантажень у елементах копструкції крана на основі чотири- та тримасової динамічних моделей із використанням статичної та динамічної механічних характеристик асинхронного приводу. В роботі [8] запропонована тримасова динамічна та її математичні моделі для процесу пуску та гальмування механізму переміщення крана.

Однак слід зазначити, що попри всі проведені дослідження мало приділено уваги встановленню крайових умов руху окремих мас динамічної моделі для перехідного процесу пуску механізму переміщення крана, руху на усталеній швидкості, процесу гальмування, залишковим коливанням після зупинки крана та визначенню математичних моделей крана для цих режимів.

**Мета досліджень** полягає у визначенні динамічних навантажень на металокопструкцію та привод під час переміщення вантажу краном протягом перехідного процесу пуску механізму переміщення, руху на усталеній швидкості, процесу гальмування та залишкових коливань після зупинки крана.

**Результати досліджень.** Для проведення динамічного аналізу переміщення мостового крана під час перехідного процесу пуску, руху на усталеній швидкості, процесі гальмування та визначенні залишкових коливань металоконструкції використаємо чотиримасову динамічну модель (рис. 1) [9].

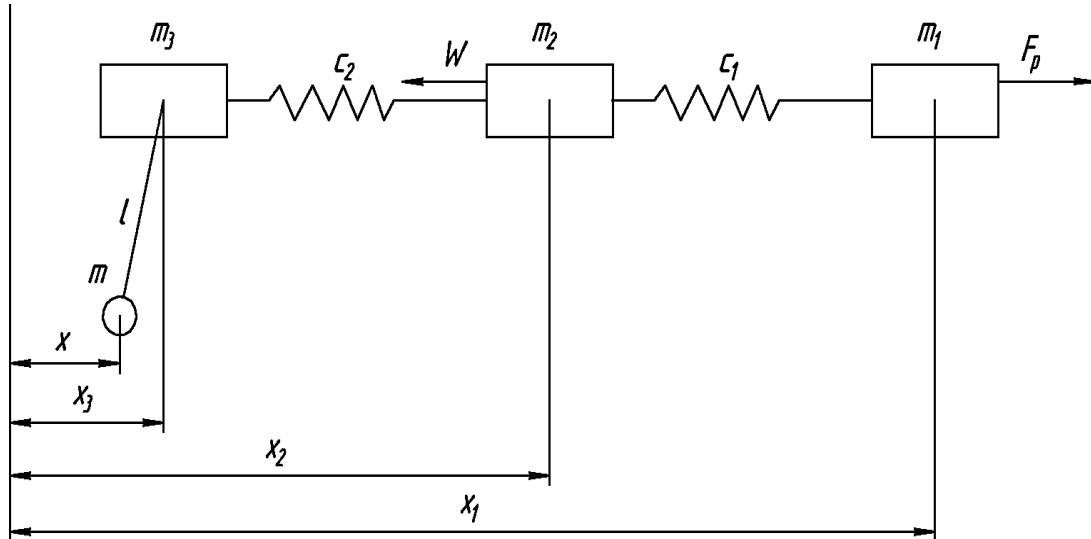


Рис. 1. Чотиримасова динамічна модель мостового крана.

Динамічна модель [10], 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 приводу  $m_1$  з'єднана з масою кінцевих балок пружним елементом з жорсткістю  $c_1$ . До маси приводу 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, приводу, кінцевих балок і балки з крановим візком відповідно.

Чотиримасова модель крана (рис. 1) описується наступною системою диференціальних рівнянь руху [9]:

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

де:  $g$  – прискорення вільного падіння.

Опір коченню переміщення крана залежить від маси крана та вантажу і визначається за наступною формулою [11]:

$$W = (0,012 \dots 0,02)(m + m_1 + m_2 + m_3)g. \quad (2)$$

Рушійна сила приведена до ходових коліс розраховується за формулою [12]:

$$F = M_{\text{дв}} \cdot i \cdot \eta_{\text{пер}} \frac{2}{D_{\text{к}}}, \quad (3)$$

де:  $M_{\text{дв}}$  – момент механізму переміщення крана;

$i$  – передаточне число механізму переміщення крана;

$\eta_{\text{пер}}$  – коефіцієнт корисної дії механізму переміщення крана;

$D_{\text{к}}$  – діаметр ходового колеса.

Крутний момент приводного двигуна механізму переміщення крана змінюється за формулою Клосса [13]:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2M_{\text{max}}(1 + S_{\text{кр}})}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}} + 2S_{\text{кр}}}, \quad (4)$$

де:  $M_{\text{max}}$  – максимальний приводний момент механізму переміщення;

$S_{\text{кр}}$  – критичне ковзання в двигуні;

$S$  – ковзання в двигуні.

Для моделювання процесу пуску механізму переміщення крана знайдемо крайові умови руху, які визначаються з таких міркувань: коли система знаходиться у стані спокою її переміщення та швидкість рівні нулю. Після закінчення пуску, швидкість крана рівна номінальній швидкості, а прискорення відсутнє. Математично це записується так:

$$\begin{cases} x(0) = x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0; \\ \dot{x}(0) = \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = 0; \\ x(T) = s; x_1(T) = s_1; x_2(T) = s_2; x_3(T) = s_3; \\ \dot{x}(T) = V; \dot{x}_1(T) = V_1; \dot{x}_2(T) = V_2; \dot{x}_3(T) = V_3, \end{cases} \quad (5)$$

де:  $s, s_1, s_2, s_3$  – переміщення зведених мас відповідно вантажу, приводу, кінцевих балок та мостової балки крана з візком в кінці перехідного процесу пуску;

$V, V_1, V_2, V_3$  – швидкості зведених мас відповідно вантажу, приводу, кінцевих балок та мостової балки крана з візком в кінці перехідного процесу пуску;

$T$  – час в кінці перехідного процесу пуску крана.

Початкові умови для усталеного руху крана будуть кінцевими для перехідного процесу пуску, в результаті запишемо:

$$\begin{cases} x(T) = s; x_1(T) = s_1; x_2(T) = s_2; x_3(T) = s_3; \\ \dot{x}(T) = V; \dot{x}_1(T) = V_1; \dot{x}_2(T) = V_2; \dot{x}_3(T) = V_3; \\ x(T_1) = s'; x_1(T_1) = s_1'; x_2(T_1) = s_2'; x_3(T_1) = s_3'; \\ \dot{x}(T_1) = V'; \dot{x}_1(T_1) = V_1'; \dot{x}_2(T_1) = V_2'; \dot{x}_3(T_1) = V_3', \end{cases} \quad (6)$$

де:  $s', s_1', s_2', s_3'$  – переміщення зведених мас відповідно вантажу, приводу, кінцевих балок та мостової балки крану з візком в кінці перехідного процесу пуску;

$V', V_1', V_2', V_3'$  – швидкості зведених мас відповідно вантажу, приводу, кінцевих балок та мостової балки крану з візком в кінці перехідного процесу пуску;

$T_1$  – час в кінці переміщення крана на усталеній швидкості.

Аналогічно, для процесу гальмування початкові умови руху, будуть кінцевими умовами усталеного руху.

Із урахуванням того, що гальмування крана відбувається за рахунок противмикання двигуна механізму переміщення крану та накладанням гальм на привід, відповідно переміщення і швидкість зведеної маси приводу будуть рівні нулю, а крайові умови руху матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x(T_1) = s'; x_1(T_1) = s_1'; x_2(T_1) = s_2'; x_3(T_1) = s_3'; \\ \dot{x}(T_1) = V'; \dot{x}_1(T_1) = V_1'; \dot{x}_2(T_1) = V_2'; \dot{x}_3(T_1) = V_3'; \\ x(T_2) = s''; x_1(T_2) = 0; x_2(T_2) = s_2''; x_3(T_2) = s_3''; \\ \dot{x}(T_2) = V''; \dot{x}_1(T_2) = 0; \dot{x}_2(T_2) = V_2''; \dot{x}_3(T_2) = V_3'', \end{cases} \quad (7)$$

де:  $s'', s_2'', s_3''$  – переміщення зведених мас відповідно вантажу, кінцевих балок, мостової балки крану з візком в кінці процесу гальмування;

$V'', V_2'', V_3''$  – швидкості зведених мас відповідно вантажу, кінцевих та мостової балки крану з візком в кінці процесу гальмування;

$T_2$  – час в кінці процесу гальмування крана.

Під час процесу гальмування зусилля опору переміщення крана змінює свій знак на протилежний та враховується дисипація енергії коливань приводу та мостової балки.

З урахуванням гальмівного моменту механізму переміщення мостового крану приведенного до ходового колеса математична модель для процесу гальмування матиме вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -c_1(x_1 - x_2) - k_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{M_z}{R}; \\ m_2 \ddot{x}_2 = c_1(x_1 - x_2) + k_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_2(x_2 - x_3) - k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + W; \\ m_3 \ddot{x}_3 = c_2(x_2 - x_3) + k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \frac{mg}{l}(x_3 - x); \\ \ddot{x} + \frac{g}{l}(x_3 - x) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де:  $M_z$  – гальмівний момент;

$R$  – радіус ходового колеса;

$k_1$  – зведений коефіцієнт дисипації енергії приводу крана;

$k_2$  – зведений коефіцієнт дисипації енергії мостової балки крана.

Тоді для моделювання залишкових коливань крана від моменту зупинки зведеної маси привода до часу, коли механічна система прийде в стан спокою, крайові умови матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x(T_2) = s''; x_1(T_2) = 0; x_2(T_2) = s_2''; x_3(T_2) = s_3''; \\ \dot{x}(T_2) = V''; \dot{x}_1(T_2) = 0; \dot{x}_2(T_2) = V_2''; \dot{x}_3(T_2) = V_3''; \\ x(T_3) = 0; x_1(T_3) = 0; x_2(T_3) = 0; x_3(T_3) = 0; \\ \dot{x}(T_3) = 0; \dot{x}_1(T_3) = 0; \dot{x}_2(T_3) = 0; \dot{x}_3(T_3) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де:  $T_3$  – час в момент повної зупинки крана.

Аналогічно як для процесу гальмування, так і для дослідження зміни залишкових коливань після зупинки крана в математичну модель (8) необхідно ввести складову дисипації коливань вантажу, а рівняння руху зведеної маси привода виключимо, оскільки остання не виконує ніякого переміщення. Тоді математична модель крана для дослідження залишкових коливань матиме вигляд:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = c_1(x_1 - x_2) + k_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_2(x_2 - x_3) - k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - W; \\ m_3 \ddot{x}_3 = c_2(x_2 - x_3) + k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \frac{mg}{l}(x_3 - x) = 0; \\ \ddot{x} - \frac{g}{l}(x_3 - x) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

В результаті розв'язку систем диференціальних рівнянь (1), (8) та (10) з урахуванням виразів (5), (6), (7) та (9) отримані залежності, що характеризують перехідний процес пуску механізму переміщення крана, рух на усталеній швидкості, процес гальмування та залишкові коливання після зупинки крана, вони мають значний об'єм і тут не наводяться.

Побудуємо графічні залежності, що характеризують швидкість зведеної маси мостової балки з крановим візком (рис. 2), зведене зусилля в мостовій (рис. 3) та в кінцевих балках крана (рис. 4) при переміщенні вантажу масою 20 тонн, що закріплений на гнучкому підвісі довжиною 7 метрів для крана, параметри якого наведені у [7].

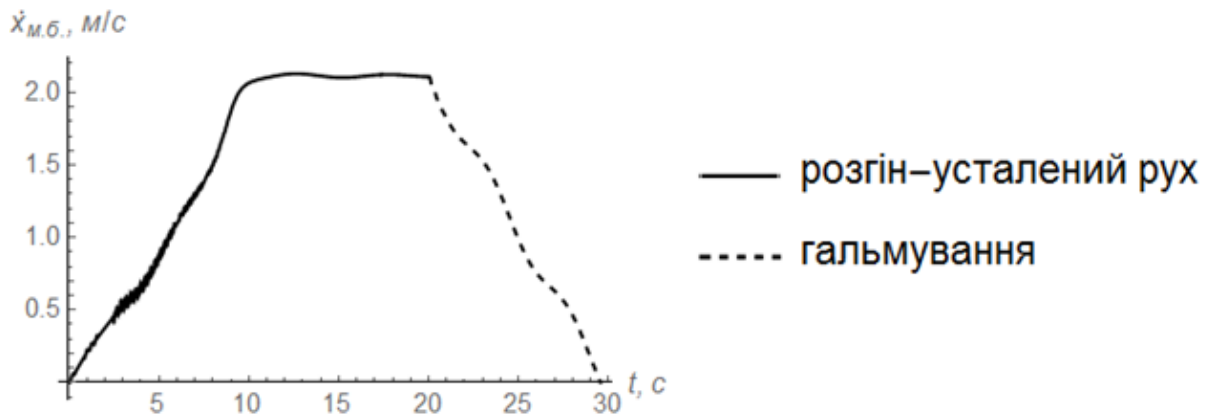


Рис. 2. Швидкість зведеної маси мостової балки з крановим візком під час переміщення крана.

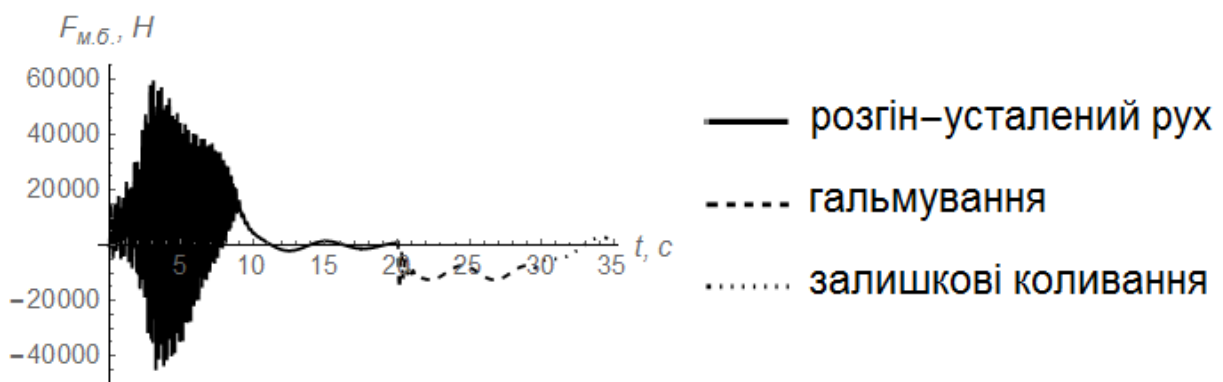


Рис. 3. Зведене зусилля в мостовій балці крана під час переміщення крана.

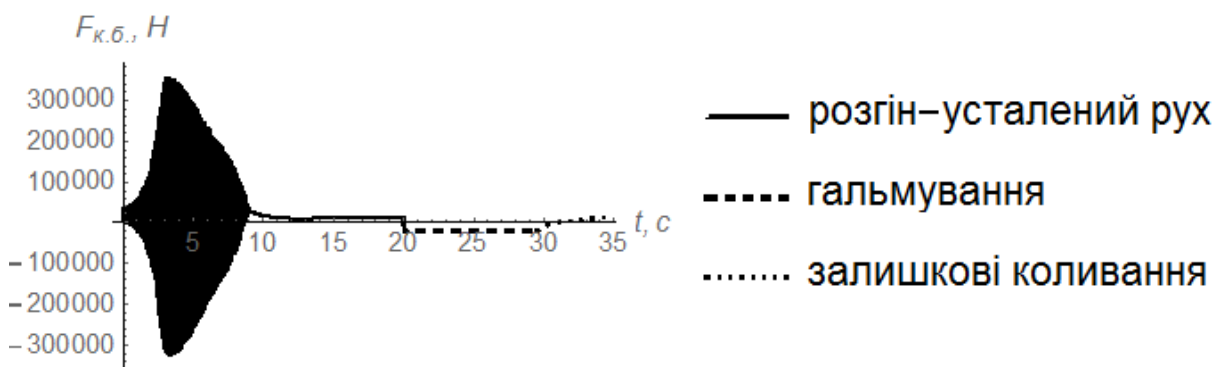


Рис. 4. Зведене зусилля в кінцевих балках крана під час переміщення крана.



## Висновки

У результаті чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху отримано графічні залежності, що відображають швидкість зведеної маси мостової балки з крановим візком (рис. 2), зведенні зусилля в мостовій (рис. 3) та кінцевих балках (рис. 4) під час перехідного процесу пуску, переміщенні крана на усталеній швидкості, гальмуванні та залишкових коливань. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші пікові динамічні навантаження діють на металоконструкцію саме під час пуску механізму переміщення крана. Так, наприклад, для крана при переміщенні вантажу масою 20 тон, що закріплений на гнучкому підвісі 7 метрів зусилля в мостовій балці крана на усталеній швидкості становить 10553 Н, а під час пуску 77096 Н. Максимальне зусилля в приводі під час пуску становлять 322051 Н, а під час переміщення крана на усталеній швидкості лише 33574 Н. Наведені результати показують значне збільшення, динамічних навантажень на елементи металоконструкцій та приводу під час перехідного процесу пуску в порівнянні з усталеним рухом крана, гальмуванням та залишковими коливаннями після зупинки крана.

Результати даного дослідження можуть бути використані для пошуку раціонального рішення і направлені на зменшення динамічних навантажень у металоконструкції та приводному механізмі шляхом оптимізації перехідних режимів пуску/гальмування.

## Список літератури

1. Чернышенко А. В., Мельниченко А. А., Фесенко Г. И. Ударные нагрузки при движении кранов по рельсовому пути // *Машинобудування*. 2009. №4. С. 70—84.
2. Данило Я. Математичне моделювання поперечних коливань складеної металоконструкції мостового крана // *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: тези доповідей*. Львів. 2012. С. 113.
3. Стрельцов С. В., Рыжиков В. А., Харламов П. В. Влияние процесса торможения на напряженное состояние металлоконструкции козлового крана // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. №6. С. 1—7.
4. Чернова Н. М., Кобзев Р. А. Определение нагрузок на металлические конструкции козловых кранов от действия перекосных усилий при проектировании // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. №5. С. 77—83.
5. Gašić V., Zrnić Z., Milovančević M. Considerations of various moving load models in structural dynamics of large gantry cranes // *FME Transactions*. Vol. 41, No 4. 2013. [https://www.researchgate.net/publication/286495033\\_Considerations\\_of\\_various\\_moving\\_load\\_models\\_in\\_structural\\_dynamics\\_of\\_large\\_gantry\\_cranes](https://www.researchgate.net/publication/286495033_Considerations_of_various_moving_load_models_in_structural_dynamics_of_large_gantry_cranes).
6. Макурин А. В., Морозов Д. И. Динамика продольного перемещения мостового крана с учетом упругости элементов конструкции // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. №3. С. 167—169.

7. Будіков Л. Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідйомних кранів мостового типу: монографія. Луганськ. 2003. 210 с.
8. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины. Киев. 1989. 328 с.
9. 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.
10. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Крушельницький В. В. Оптимізація перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана за критерієм середньоквадратичного значення зусилля у мостовій балці // Підйомно-транспортна техніка. 2015. №3. С. 27—35.
11. Комаров М. С. Динамика грузоподъемных машин. Москва. Машгиз. 1953. 188 с.
12. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Крушельницький В. В. Аналіз динамічних моделей руху мостового крана при горизонтальному переміщенні // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2015. № 85. С. 5—13.
13. Крицштейн А. М. Электрические машины: методические указания. Ульяновск. УлГТУ. 2003. 51 с.

## References

1. Chernyishenko A. V., Melnichenko A. A., Fesenko G. I. (2009) Udarnyie nagruzki pri dvizhenii kranov po relsovomu puti [Shock loads during the movement of cranes along the track]. Mashinobuduvannya. 4. 70-84.
2. Danylo Ya. (2012) Danylo Ya. Matematychnе modeliuвання poperechnykh kolyvan skladoeni metalokonstruktsii mostovoho kрана [Mathematical modeling of transverse vibrations of composite metal overhead crane]. Teoriia ta praktyka ratsionalnogo proektuvannya, vyhotovlennia i ekspluatatsii mashynobudivnykh konstruktsii : Tezy dopovidei. Lviv. KINPATRI LTD. 113.
3. Streltsov S. V., Ryzhikov V. A., Harlamov P. V. (2013) Vliyanie protsessa tormozheniya na napryazhennoe ostoyanie metalokonstruktsii kozlovogo kрана [Influence of the braking process on the stressed state of the metal structure of the gantry crane]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 6. 1-7.
4. Chernova N. M., Kobzev R. A. (2013) Opredelenie nagruzok na metallicheskie konstruktsii kozlovyih kранов ot deystviya perekosnyih usilii pri proektirovani [Definition of loads of metal designs of gantry cranes from action of reinert efforts at design]. Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 5. 77-83.
5. Gašić V., Zrnić Z., Milovančević M. (2013). Considerations of various moving load models in structural dynamics of large gantry cranes [Elektronnyi resurs] // FME Transactions. Vol. 41, No 4. Rezhym dostupu do resursu: [https://www.researchgate.net/publication/286495033\\_Considerations\\_of\\_various\\_moving\\_load\\_models\\_in\\_structural\\_dynamics\\_of\\_large\\_gantry\\_cranes](https://www.researchgate.net/publication/286495033_Considerations_of_various_moving_load_models_in_structural_dynamics_of_large_gantry_cranes).
6. Makurin A. V., Morozov D. I. (2011) Dinamika prodolnogo peremescheniya mostovogo kрана s uchetom uprugosti elementov konstruktsii [Dynamics of longitudinal movement of the bridge crane taking into account elasticity of elements of a design]. Elektrotehnichna ta komp'yuterna sistemi. 3. 167-169.
7. Budikov L. Ya. (2003) Bahatoparametrychnyi analiz dynamiky vantazhopidomnykh kранiv mostovoho typu [Multiparameter analysis of the dynamics of cranes bridge type]. Monohrafiia. Luhansk. vyd-vo SNU im. V. Dalia, vyd. 2-e. 210.

8. Gaydamaka V. F. (1989). Gruzopodemnyie mashiny [Load-lifting machines]. Kiev. Vyischa shkola. 328.
9. 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.
10. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Krushelnytskyi V. V. (2015). Optyimizatsiia perekhidnogo protsesu pusku mekhanizma peremishchennia mostovoho krana za kryteriiem serednokvadratynchnoho znachennia zusyillia u mostovii baltsi [Optimization of transition process start-up the movement mechanism of the overhead crane by the criterion RMS value of efforts in the bridge beam]. Pidiomno-transportna tekhnika. 3(47). 27-35.
11. Komarov M. S. (1953). Dinamika gruzopod'emnyih mashin. [Dynamics of load-lifting machines]. Moskva. MASHGIZ. 188.
12. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Krushelnytskyi V. V. (2015). Analiz dynamichnykh modelei rukhu mostovoho krana pry horizontalnomu peremishchenni [Analysis of dynamic models of movement bridge crane during horizontally moving]. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny. 85. 5-13.
13. Kritsshteyn A. M. (2003). Elektricheskie mashiny: Metodicheskie ukazaniya [Electrical machines: Methodical instructions]. Ulyanovsk. UIGTU. 51.

## **ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

***В. С. Ловеикин, В. В. Крушельницкий***

**Аннотация.** В работе проведен динамический анализ движения мостового крана для переходного процесса пуска механизма перемещения мостовой балки, движения на устоявшейся скорости, процесса торможения и остаточных колебаний. Для получения графических зависимостей, характеризующих исследуемые режимы использована четырехмассовая динамическая модель и ее математическая модель, которая является многоэтапной и каждый этап описывается системой дифференциальных уравнений. Кроме того, записанные начальные и конечные условия движения отдельных масс. Динамический анализ выполнялся с учетом нелинейности момента приводного двигателя, который изменялся по формуле Клосса. Теоретические исследования выполнялись для крана грузоподъемностью 20 тонн с использованием метода численного интегрирования дифференциальных уравнений. Выявлено, что металлоконструкция подвергается динамическим нагрузкам в течение всего процесса перемещения, а также после остановки крана. Наибольшие нагрузки возникают именно при пуске приводного механизма перемещения мостовой балки. Полученные

результаты данной работы можно использовать для поиска рационального решения, которое позволит снизить динамические нагрузки, возникающие в металлоконструкции и приводном механизме перемещения крана путем оптимизации режимов управления.

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

## **DYNAMIC ANALYSIS OF MOVING CRANE TAKING INTO ACCOUNT MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DRIVE MOTOR**

**V. S. Loveikin, V. V. Krushelnitsky**

**Abstract.** *In work is carried out the dynamic analysis of the movement of the overhead crane for the transition process, the launch of the movement mechanism of a bridge beam, the movement at the settled speed, braking, and residual fluctuations. For obtaining the graphic dependences characterizing the investigated modes used the fourmass dynamic model of the crane, and her mathematical model which is multi-stage and each stage is described by the system of the differential equations. Besides, the described initial and final traffic conditions of separate masses. The dynamic analysis was made taking into account nonlinearity of change of the moment of the driving engine which changed by Klos's formula. Theoretical researches were carried out for the crane with a lifting capacity of 20 tons and the using a method of numerical integration the differential equations. It is revealed that the metal construction is exposed to dynamic loadings during all process of movement, and also after a crane stop. The greatest loadings arise at the start-up the driving mechanism of movement a bridge beam. The received results of this work can be used for search the rational decision which will allow lowering the dynamic loadings arising in a metal construction and in the driving movement mechanism of the crane by optimization control modes.*

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