

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ МОСТОВОГО КРАНА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ПЕРЕМІЩЕННІ

Вячеслав Ловейкін, Юрій Ромасевич, Віктор Крушельницький

*Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 11, Київ, Україна, 03041, e-mail: bass.kp@mail.ru*

ANALYSIS OF DYNAMIC MODELS OF MOVEMENT BRIDGE CRANE DURING HORIZONTALLY MOVING

Vyacheslav Loveykin, Juriy Romasevich, Viktor Krushelnytskyi

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroyiv Oborony Str., 11, Kyiv, Ukraine, 03041, e-mail: bass.kp@mail.ru*

АНОТАЦІЯ. У роботі проведений аналіз динамічних моделей руху мостового крана з урахуванням механічної характеристики приводного двигуна механізму горизонтального переміщення. Поставлене завдання вирішене за допомогою чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху мостового крана. Результати роботи проілюстровані графіками, що характеризують перехідний процес розгону балки мостового крана.

Ключові слова: мостовий кран, динамічні навантаження, динамічна модель, математична модель, приведена маса, балка крана.

АННОТАЦИЯ. В работе проведен анализ динамических моделей движения мостового крана с учетом механической характеристики приводного двигателя механизма горизонтального перемещения. Поставленная задача решена с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений движения мостового крана. Результаты работы проиллюстрированы графиками, характеризующие переходный процесс разгона балки мостового крана.

Ключевые слова: мостовой кран, динамические нагрузки, динамическая модель, математическая модель, приведенная масса, балка крана.

ABSTRACT. Purpose. The dynamic analysis of the models motion bridge crane considering the mechanical characteristics of the drive motor mechanism of horizontal displacement. **Methodology/approach.** In the article for the solution of differential equations of motion of the bridge crane used numerical integration. **Findings.** Graphs have illustrated transition process of bridge's crane during start-up. **Research limitations/implications.** The movement of the mechanical system have accompanied by fluctuations in of cargo, which transmitted, to the framework bridge crane. **Originality/value.** To avoid fluctuation of a framework, it is necessary to execute controls of the electric drive.

Key words: bridge crane, dynamic loads, dynamic model, mathematical model, the reduced mass, beam crane.

ВСТУП

При переміщенні вантажів мостовим краном його металоконструкції піддаються значним динамічним навантаженням. На різних етапах руху відбувається коливання моста крана, кінцевих балок, вантажу та інших вузлів і їх елементів, що входять до механічної системи. Слід відмітити перехідний процес розгону механізму переміщення моста, адже цей процес супроводжується найбільшими значеннями динамічних навантаженнями, що прямо впливають на швидкість виконання операції (циклу), додаткові витрати електроенергії, надійність крана та призводить до додаткових матері-

альних витрат на ремонт. Тому для подальших досліджень цих негативних факторів необхідно провести динамічний аналіз руху механічної системи. Висвітленню питань динамічного аналізу руху мостового крана присвячена достатньо велика кількість наукових праць.

В Донецькому національному технічному університеті спільно з магдебурзьким університетом ім. Отто фон Геріке [1] досліджувались поперечні коливання моста при його переміщенні з різними положеннями візка як системи з розподіленими параметрами з використанням пакета Comsol Multiphysics. В роботі досліджувалася тримасова динамічна модель, результатом якої

є графіки перехідних процесів руху механічної системи. Також автори цієї роботи запропонували модальний регулятор [2], що дозволяє гасити пружні коливання як у лінійній моделі, так і в моделі з розподіленими параметрами. Для подальших досліджень використовувалася спрощена двомасова динамічна модель, в якій було прийнято, що візок нерухомо закріплений в середині балки. Спрощена модель дає змогу синтезувати регулятор стану для ефективного гасіння коливань конструкції моста в напрямку його руху. Для дослідження використовувалася двомасова динамічна модель.

В Сибірському федеральному університеті [3] проводилося математичне моделювання коливання балки мостового крана. На основі рівняння Лагранжа другого роду побудована математична модель коливань балки зі змінними масою і навантаженням. Отримані закономірності зміни прогину балки в певні моменти часу. Для розв'язку рівняння використовувався чисельний метод. Автори роботи [4] займалися проблемою оцінки технічного стану металоконструкції кранів мостового типу. Вони запропонували математичну модель для дослідження параметрів коливань прогонових балок для різних положень візка та для ділянок балки за довжиною прогону. В диференціальному рівнянні руху врахований ударний імпульс. Автори роботи [5] досліджували механізм підйому мостового крана, де використана двомасова динамічна модель. Для побудови раціональних експлуатаційних режимів керування мостовим краном запропоновано контролювати темп наростання динамічних навантажень при заданій продуктивності мікроконтролером.

В Сибірській державній автомобільно-дорожній академії проводилось моделювання процесу розгону мостового крана. В роботі [6] використовувалася тримасова динамічна модель; прийняті припущення, що гнучка підвіска вантажу замінена пружним зв'язком з умовною горизонтальною жорсткістю та не враховано зазори в приводі. Сила опору пересуванню крана прийнята постійною, з'єднання головних і кінцевих балок розглядається як шарнірне,

рушійне зусилля приводу прийняте постійним та відсутнє буксування коліс. Розрахунок процесу розгону крана проводився чисельним методом Рунге-Кутта. Автори роботи [7] запропонували методіку моделювання процесу розгону мостових кранів в середовищі COSMOS Motion в режимі реального часу. В роботі враховано залежність приводного моменту двигуна від частоти обертання вала та матеріал поверхні тертя.

МЕТА РОБОТИ

Мета дослідження полягає у проведенні порівняльного динамічного аналізу руху балки мостового крана з урахуванням механічної характеристики електродвигуна механізму горизонтального переміщення.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для проведення дослідження використано дво- та тримасову динамічні моделі мостового крана без вантажу та з вантажем на гнучкому підвісі (рис. 1, 8). Розглянуто двомасову динамічну модель (рис. 1) без врахування вантажу як частний випадок тримасової моделі (рис. 8):

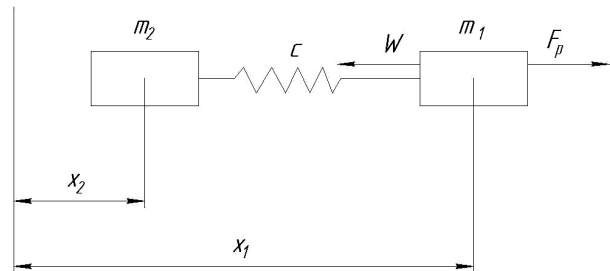


Рис. 1. Двомасова динамічна модель мостового крана

Fig. 1. Two-mass dynamic model of bridge crane

На рис. 1 зображено зведені маси m_1 , m_2 відповідно кінцевих балок з приводом та балки з крановим візком. Маса приводу і кінцевих балок з'єднана із зведеною масою кранового візка та балкою крана пружним елементом з жорсткістю c . До маси приводу і кінцевих балок прикладено рушійне зусилля F_p та силу опору переміщенню балки крана W . В цій моделі x_1, x_2 уза-

гальнені координати мас кінцевих балок з приводом і балки кранового візка відповідно, а l – довжина гнучкого підвісу вантажу.

Динамічна модель (рис. 1) описується наступною системою диференціальних рівнянь руху (крапка над символом означає диференціювання за часом):

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = F_p - W - c(x_1 - x_2); \\ m_2 \ddot{x}_2 = c(x_1 - x_2). \end{cases} \quad (1)$$

Опір коченню ходового колеса по рейці визначається за формулою [8]

$$W = k_p (m_1 + m_2) \left(f \frac{d}{2} + \mu \right) \frac{2}{D_k}, \quad (2)$$

де m_1 – маса кінцевих балок з приводом; m_2 – маса балки крана і електроталі; f – коефіцієнт тертя в опорі ходового колеса; d – діаметр цапфи вала (осі) колеса; D_k – діаметр ходового колеса; μ – коефіцієнт тертя кочення; k_p – коефіцієнт додаткових опорів (визначається тертям реборд о голові рейки і тертям елементів струмознімного пристрою).

Рушійна сила, зведена до ходових коліс, розраховується за формулою

$$F = M_{\text{об}} \cdot i \cdot \eta_{\text{пер}} \frac{2}{D_k}. \quad (3)$$

Крутний момент двигуна змінюється за формулою Клосса [10]

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

Ковзання в двигуні

$$S = \frac{\omega_0 - \omega_d}{\omega_0}. \quad (5)$$

Кутова швидкість на валу електродвигуна

$$\omega_d = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad (6)$$

де n_n – номінальна частота обертання вала двигуна.

Кутова швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \quad (7)$$

де f – частота напруги живлення двигуна; p – кількість пар полюсів електродвигуна.

Критичне ковзання в двигуні

$$S_{\text{кр}} = S(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (8)$$

де λ – перевантажувальний коефіцієнт двигуна.

Максимальний крутний момент двигуна

$$M_{\text{max}} = M_{\text{об}} \cdot \lambda. \quad (9)$$

Жорсткість моста крана визначаються за формулою [9]

$$c = \frac{48EJ}{L^3}, \quad (10)$$

де E – модуль пружності; J – момент інерції перерізу двотаврової балки; L – довжина моста крана.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) виконано з використанням чисельного інтегрування за наступних розрахункових даних і технічними характеристиками для електродвигуна переміщення моста крана АОП 22-4-3:

$$k_p = 1,1; m_1 = 546,4 \text{ кг}; m_2 = 669,6 \text{ кг};$$

$$f = 0,015; d = 0,014 \text{ м}; \mu = 0,003;$$

$$D_k = 0,2 \text{ м}; i = 29; \eta_{\text{пер}} = 0,88; W = 407,4 \text{ Н};$$

$$n = 1400; c = 679680; \omega_d = 146,33 \text{ рад/с};$$

$$f = 50 \text{ Гц}; p = 2; \omega_0 = 157 \text{ рад/с};$$

$$S = 0,068; \lambda = 2,3; S_{\text{кр}} = 0,3;$$

$$M_{\text{max}} = 6,29 \text{ Н} \cdot \text{м}; J_x = 7293 \text{ см}^4;$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; L = 10 \text{ м}; c = 679680 \text{ Н/м}.$$

У результаті чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь (1), що описують рух мостового крана, отримані графіки, які наведені на рис. 2...7.

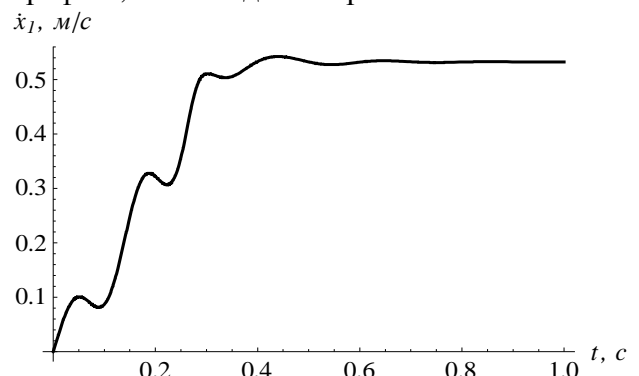


Рис. 2. Графік зміни швидкості кінцевих балок з приводом

Fig. 2. Graph changes of drive velocity and ends-girders

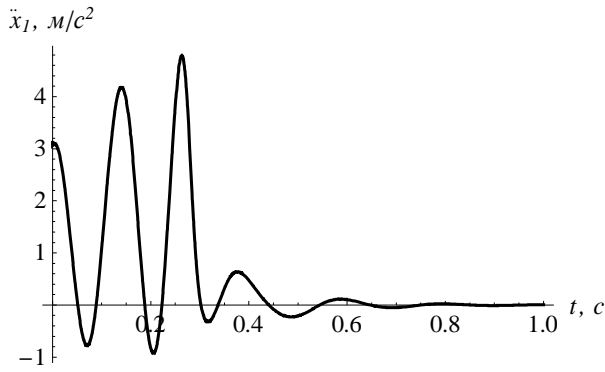


Рис. 3. Графік зміни прискорення приводу і кінцевих балок

Fig. 3. Graph changes of acceleration drive and of end-girders

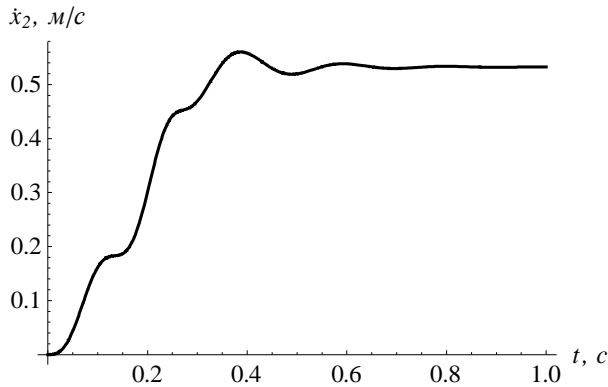


Рис. 4. Графік зміни швидкості мостової балки з крановим візком

Fig. 4. Graph changes of trolley velocity and crane bridge beams

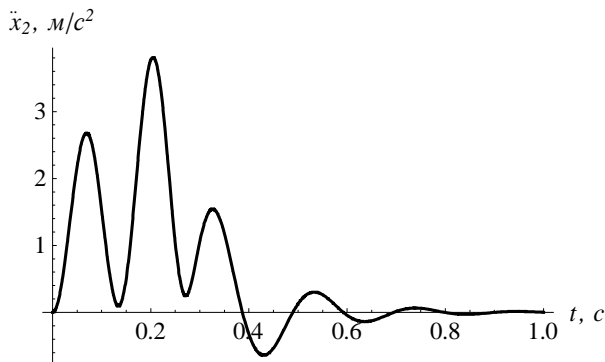


Рис. 5. Графік зміни прискорення мостової балки з крановим візком

Fig. 5. Graph changes of trolley and crane bridge beams acceleration

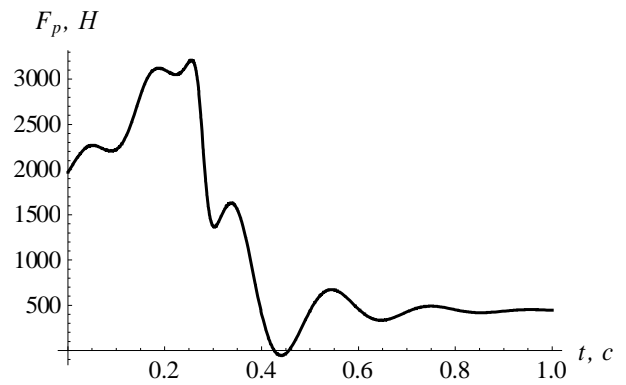


Рис. 6. Графік зміни рушійного зусилля крана

Fig. 6. Graph changes the driving force of the crane

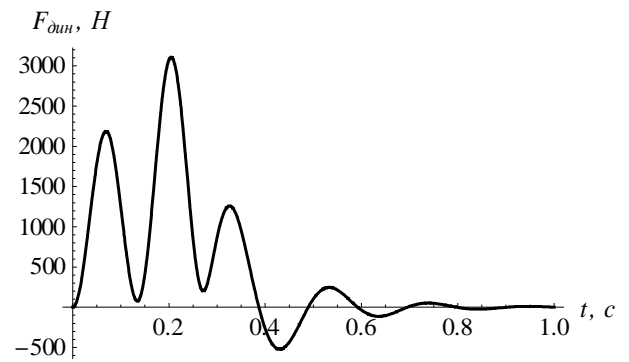


Рис. 7. Графік зміни пружного зусилля в мостовій балці крана

Fig. 7. Graph changes of elastic force in bridge girder crane

На рис. 8 наведено ускладнену динамічну модель крана, у якій враховується вантаж на гнучкому підвісі.

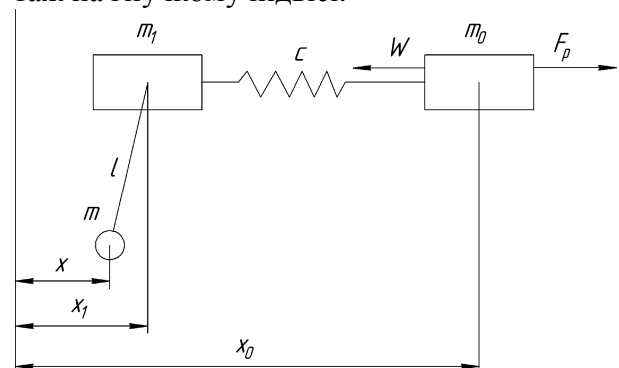


Рис. 8. Тримасова динамічна модель мостового крана

Fig. 8. Three-mass dynamic model of bridge crane

На рис. 8 m_0 , m_1 , m – зведені маси кінцевих балок з приводом, кранового візка і

балки та вантажу. Маса приводу і кінцевих балок з'єднані із зведеною 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 моделі x , x_0 , x_1 – узагальнені координати мас вантажу, приводу і кінцевих балок кранового візка і балки відповідно, а l – довжина гнучкого підвісу вантажу.

Ця динамічна модель описується наступною системою диференціальних рівнянь руху:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 = F_p - W - c(x_0 - x_1); \\ m_1 \ddot{x}_1 = c(x_0 - x_1) - \frac{mg}{l}(x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l}(x_1 - x). \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (11) виконано з використанням чисельного інтегрування та наступними розрахунковими даними:

$$k_p = 1,1; \quad m = 3200 \text{ кг}; \quad m_0 = 546,4 \text{ кг};$$

$$m_1 = 669,6 \text{ кг}; \quad f = 0,015; \quad d = 0,014 \text{ м};$$

$$\mu = 0,003; \quad D_k = 0,2 \text{ м}; \quad i = 29; \quad \eta_{пер} = 0,88;$$

$$W = 1479,63 \text{ Н}; \quad n = 1400; \quad c = 679680;$$

$$\omega_d = 146,33 \text{ рад/с}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad p = 2;$$

$$\omega_0 = 157 \text{ рад/с}; \quad S = 0,068; \quad \lambda = 2,3;$$

$$S_{кр} = 0,3; \quad M_{\max} = 6,29 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad J_x = 7293 \text{ см}^4;$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad L = 10 \text{ м}; \quad c = 679680 \text{ Н/м};$$

$$l = 6 \text{ м}.$$

Результати розрахунків наведено на графіках (рис. 9...22).

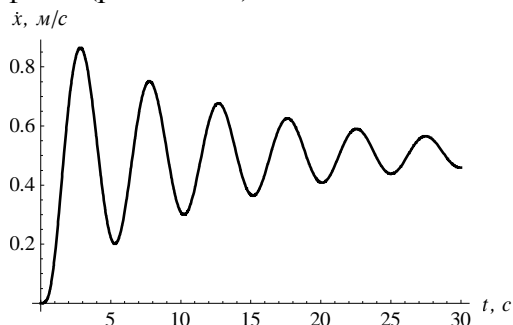


Рис. 9. Графік зміни швидкості вантажу

Fig. 9. Graph changes velocity of cargo

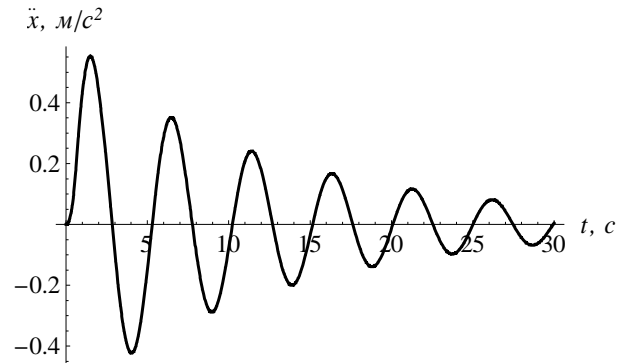


Рис. 10. Графік зміни прискорення вантажу

Fig. 10. Graph changes acceleration of cargo

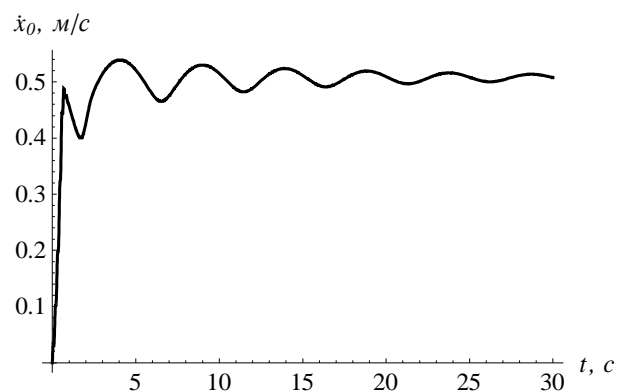


Рис. 11. Графіки зміни швидкості кінцевих балок з приводом (тривалість переміщення 30 секунд)

Fig. 11. Graphs change of velocity drive and end-girders (duration moving 30 seconds)

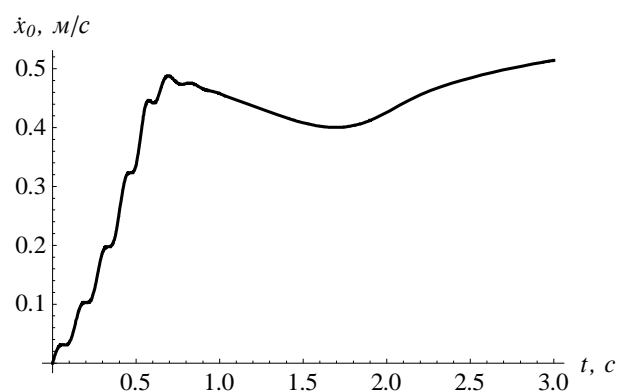


Рис. 12. Графіки зміни швидкості кінцевих балок з приводом (тривалість переміщення 3 секунди)

Fig. 12. Graphs change of velocity drive and end-girders (duration moving 3 seconds)

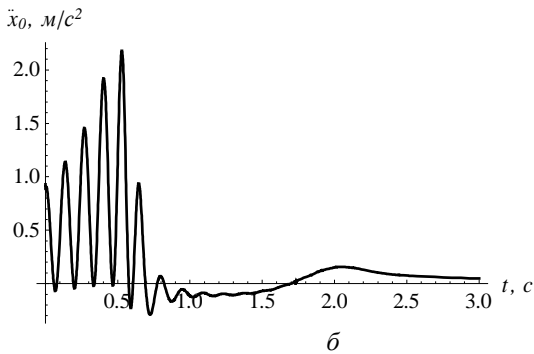
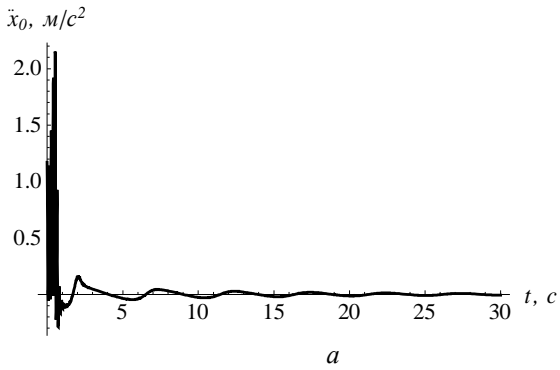


Рис. 13. Графіки зміни прискорення кінцевих балок з приводом: *a* – тривалість переміщення 30 секунд;

б – тривалість переміщення 3 секунди

Fig. 13. Graphs change of acceleration drive and end-girders: *a* - duration moving 30 seconds; *b* - duration moving 3 seconds

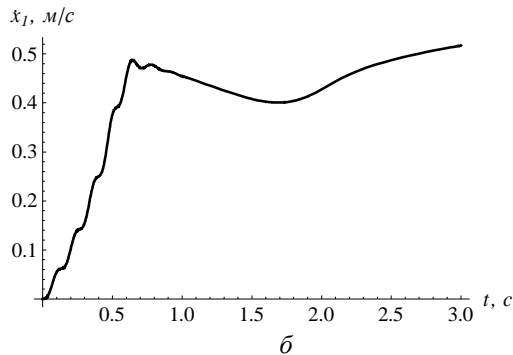
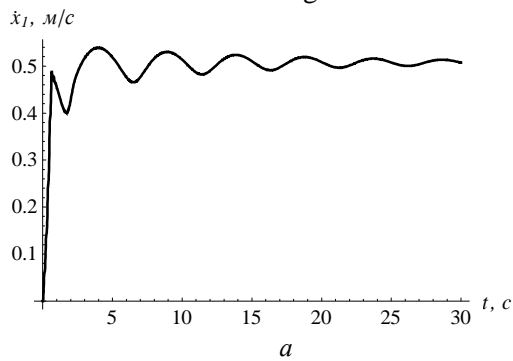


Рис. 14. Графіки зміни швидкості мостової балки з крановим візком: *a* – тривалість переміщення 30 секунд; *б* – тривалість переміщення 3 секунди

Fig. 14. Graphs change of velocity and of end-girders: *a* - duration moving 30 seconds; *b* - duration moving 3 seconds

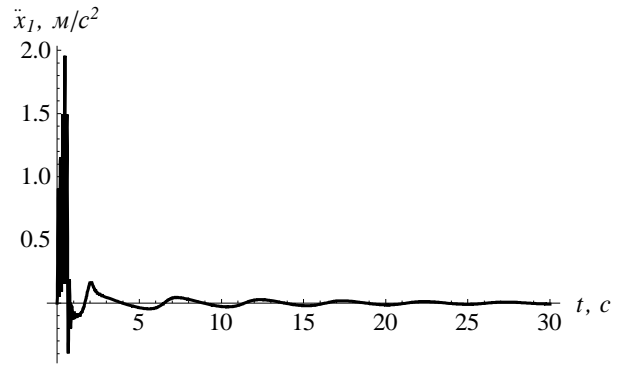


Рис. 15. Графіки зміни прискорення мостової балки з крановим візком (тривалість переміщення 30)

Fig. 15. Graph changes of acceleration trolley and crane bridge beams (duration moving 30 seconds)

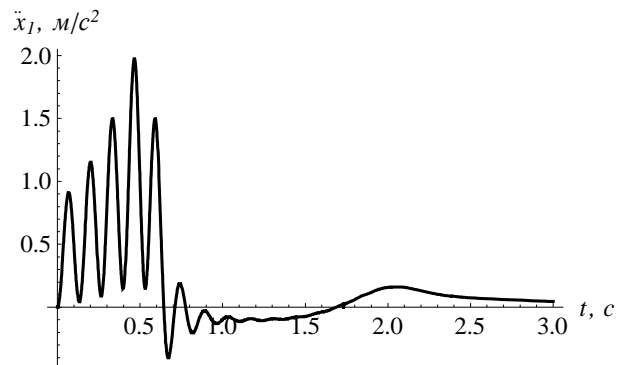


Рис. 16. Графіки зміни прискорення мостової балки з крановим візком (тривалість переміщення 3 секунди)

Fig. 16. Graph changes of acceleration trolley and crane bridge beams (duration moving 3 seconds)

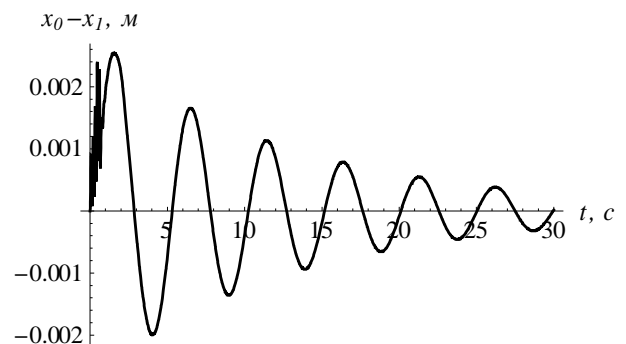


Рис. 17. Графік відхилення кранового візка і мостової балки від приводу і кінцевих балок

Fig. 17. Graph of deviation of crane trolley and of bridge beam from the drive and ends-girders

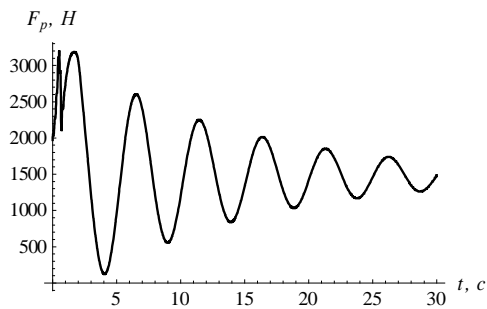


Рис. 18. Графіки зміни рушійного зусилля крана (тривалість переміщення 30 секунд)

Fig. 18. Graph changes the driving force of the crane (duration moving 30 seconds)

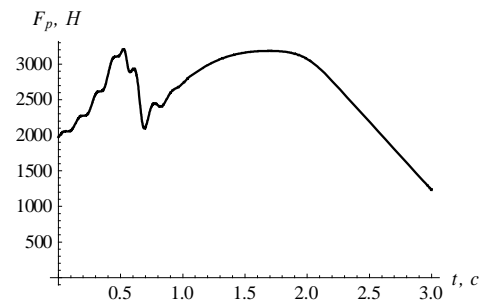
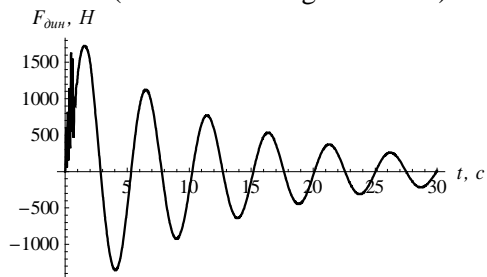
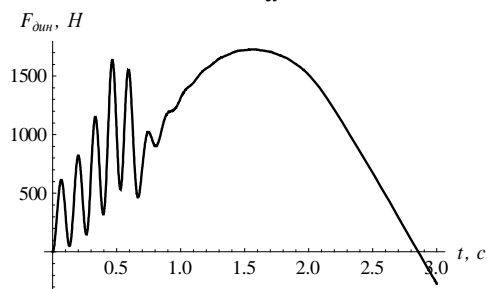


Рис. 19. Графіки зміни рушійного зусилля крана (тривалість переміщення 3 секунди)

Fig. 19. Graph changes the driving force of the crane (duration moving 3 seconds)



a



б

Рис. 20. Графік зміни пружного зусилля в мостовій балці крана: *a* – тривалість переміщення 30 секунд; *б* – тривалість переміщення 3 секунди

Fig. 20. Graph changes of elastic force in bridge girder crane: *a* - duration moving 30 seconds; *b* - duration moving 3 seconds

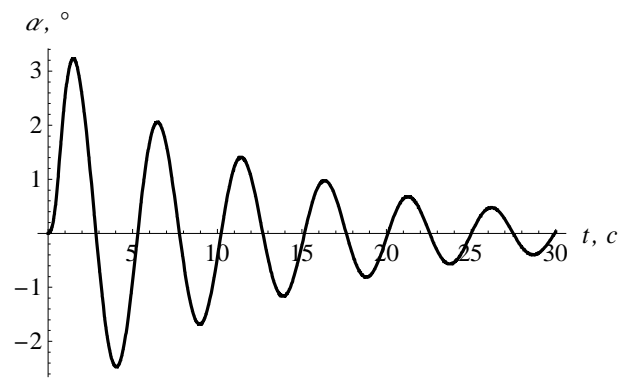


Рис. 21. Графік зміни кута відхилення вантажу відносно талі та мостової балки крана

Fig. 21. Graph changes angle of deflection of cargo relative to trolley and crane bridge beams

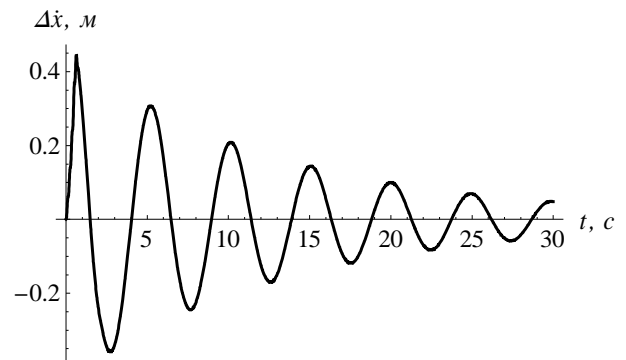


Рис. 22. Графік зміни швидкості відхилення вантажу відносно швидкості талі та мостової балки крана

Fig. 22. Graph change the speed deviation of cargo relative to velocity of trolley and crane bridge beams

ВИСНОВКИ

Графіки, що зображені на рис. 2...5, 9...16, відображають зміну швидкості і прискорення маси приводу і кінцевих балок, маси мостової балки та вантажу при русі мостового крана. З графіків видно, що перехідний процес розгону супроводжується коливаннями швидкості та прискорення, однак при досягненні усталеної швидкості механізмом переміщення коливання плавно затухають. Перехідний процес супроводжується динамічними навантаженнями, що видно з рис. 6, 7, 18...20 які відображають зміну рушійного та пружного зусиль у мостовій балці. Це зумовлено дією елект-

ромагнітного моменту двигуна, який змінюється за рівнянням Клоса і є нелінійним.

При розв'язку диференціальних рівнянь, що описують рух тримасової динамічної моделі, у якій враховано вантаж, що закріплений на гнучкому підвісі, отримані графіки перехідного процесу пуску (рис. 9-22). Слід відзначити, що після досягнення системою усталеної швидкості, коливання швидкості та прискорення мас приводу і кінцевих балок, кранового візка і мостової балки мають плавно згасаючий характер. Цей процес зумовлений коливаннями швидкості і прискорення вантажу (рис. 9,10). Також отримані графіки швидкості коливання вантажу і відхилення його відносно маси талі та мостової балки крана (рис.21, 22). Пікове значення коливання вантажу відбувається на початку пуску системи і становить близько 3° та має плавно згасаючий характер. Відхилення кранового візка і мостової балки відносно кінцевих балок з приводом показує, що рух системи супроводжується плавно-згасаючими коливаннями (рис.17). Цей процес зумовлений коливаннями вантажу.

Усунути коливання, на початку руху можливо шляхом оптимізації перехідного процесу розгону/гальмування. Оптимізація перехідного процесу дасть змогу зменшити динамічні навантаження на металоконструкції мостового крана та покращить динамічні показники кранового механізму.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Палис Ф.* Анализ поперечных колебаний мостового крана при изменении положения тележки / Ф. Палис, О. И. Толочко, Д. В. Бажутин // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 36-39.
2. *Палис Ф.* Гашения горизонтальных упругих колебаний конструкции мостового крана / Ф. Палис, О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Теорія і практика. Тематичний випуск. – Кременчук: КрНУ, – 2012. - №3(19). – С. 336-339.
3. *Лопатина А. А.* Математическое моделирование колебаний балки мостового крана /

А. А. Лопатина. // Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, – 2013. – 369 с.

4. *Сагиров Ю. Г.* Колебания пролетных балок мостового крана / Ю. Г. Сагиров, В. В. Суглобов // Захист металургійних машин від поломок. Маріуполь: зб. наук. пр. ПДТУ, 2008. – Вип. 10. – 347 с.
5. *Березниченко З.А.* Разработка рациональных режимов управления электромеханической системой мостового крана / З.А. Березниченко, Н.В. Климченкова, С.В. Лагуненков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – № 4 (29). – 352 с.
6. *Ахтулов А.Л.* Теоретическое исследование и моделирование процесса разгона грузоподъемного крана мостового типа / А.Л. Ахтулов, О.М. Кирасиров, Е.В. Комерзан // Омский научный вестник. – 2008 – Вып. 64 – 186 с.
7. *Комерзан Е.В.* Моделирование и анализ процесса разгона мостового крана / Е.В. Комерзан, О.М. Кирасиров // Рязань: Вестник РГРТУ. – 2008 – №4, Вып. 26. – 104 с.
8. *Гайдамака В.Ф.* Грузоподъемные машины / В.Ф. Гайдамака. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 328 с.
9. *Будіков Л.Я.* Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідйомних кранів мостового типу / Л.Я. Будіков // Монографія. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, вид. 2-е, 2003. – 210 с.
10. *Крицштейн А.М.* Электрические машины: Методические указания / А. М. Крицштейн. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 51 с.
11. *Ловейкін В.* Синтез оптимального керування рухом вантажопідйомними кранами / В. Ловейкін, Ю. Ромасевич // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2014. - №83. – С. 26-33.

REFERENCES

1. *Palis F., Tolochko O. I., Bazhutin D. V., 2013.* Analiz poperechnykh kolebanij mostovogo kрана pri izmenenii polozenija telezhki [Analysis of the transverse vibrations of the bridge crane when changing the position of the truck]. Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nach. tr. Temat. vyp.: Problemy avtomatizirovanogo

- elektroprivoda [Bulletin of the National Technical University "KHPI": collection of scientific works. Special Issue: Problems of the automated electric drive], No. 36 (1009), 36-39. - (in Russian)
2. *Palis F., Tolochko O.I., Bazhutin D.V., 2012.* Gasheniya gorizonta'lnih uprugih kolebanij konstrukcii mostovogo kрана [The horizontal damping elastic vibrations construction bridge crane], *Elektoromehanichni i energozberigajuchi sistemi. Teorija i praktika. Tematichnij vipusk.* [Electromechanical and saving system. Theory and Practice. Special issue], No.3(19), 336-339. - (in Russian)
 3. *Lopatina A. A., 2013.* Matematicheskoe modelirovanie kolebanij balki mostovogo kрана [Mathematical modeling of vibrations of the beam of bridge crane]. *Molodezh' i nauka: sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 385-letiju so dnja osnovanija g. Krasnojarska* [Youth and Science: a collection of materials IX All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists with international participation, dedicated to 385 anniversary of the founding of the city of Krasnoyarsk], Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 369. - (in Russian)
 4. *Sagirov Ju. G., Suglobov V. V., 2008.* Kolebanija proletnyh balok mostovogo kрана [Oscillations span beams overhead crane]. *Zahist metalurgijnih mashin vid polomok* [Protection of metallurgical machinery breakdowns.]. Mariupol, *zbirnik naukovih prats PDTU*, Vol. 10, 347. - (in Russian)
 5. *Bereznichenko Z.A., Klimchenkova N.V., Lagunenkov S.V. 2012.* Razrabotka racional'nyh rezhimov upravlenija elektromehanicheskoy sistemoj mostovogo kрана [The development of rational management regimes electromechanical system overhead crane]. *Visnik Donbas'koï derzhavnoï mashinobudivnoï akademii: zbirnik naukovih prac'* [Journal of Donbass State Engineering Academy: technologies], No.4 (29), 352. - (in Russian)
 6. *Ahtulov A.L., Kirasirov O.M., Komerzan E.V., 2008.* Teoreticheskoe isledovanie i modelirovanie procesa razgona gruzopodemnogo kрана mostovogo tipa [Theoretical research and modeling of the dispersal of the crane bridge type]. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], Vol. 64, 186. (in Russian)
 7. *Komerzan E.V., Kirasirov O.M., 2008.* Modelirovanie i analiz processa razgona mostovogo kрана [Modeling and analysis of the acceleration of the bridge crane]. *Rjazan': Vestnik RGRTU* [Bulletin RSREU], No. 4, Vol. 26, 104. - (in Russian)
 8. *Gajdamaka V.F. 1989.* Gruzopodemnye mashiny [Lifting machines]. Kyiv, *Vyshha shk. Golovnoe izd-vo Publ.*, 328. - (in Russian)
 9. *Budikov L.Ja., 2003.* Bagatoparametrichnij analiz dinamiki vantazhopidjomnih kранiv mostovogo tipu [Multiparameter analysis of the dynamics of cranes bridge type], Lugansk, *SNU im. V. Dalja Publ.*, 210. - (in Ukrainian)
 10. *Kricshtejn A.M., 2003.* Jelektricheskie mashiny: Metodicheskie ukazaniya [Electric cars: Methodological guidelines], Ulyanovsk, *Ulyanovsk State Technical University Publ.*, 51. - (in Russian)
 11. *Loveykin V. Romasevych Yu., 2014.* Synthesis of optimal control movement of cranes. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and agricultural machines], No.83, 26-33. - (in Ukrainian)

