

УДК 621.01

DOI: 10.15276/pidtt.1.60.2019.05

Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Крушельницький В. В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МОСТОВОГО КРАНА

***Анотація.** У статті розроблено підхід щодо оптимізації керування рухом мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі. Оптимізація виконана із врахуванням інтегрального критерію, який відображає небажані показники руху системи. У оптимізаційній задачі враховані також крайові умови руху зведених мас крана та вантажу, які забезпечують усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі. Реалізація оптимального керування виконана сучасними засобами мікроелектроніки та керованого електроприводу. Для роботи системи розроблено спеціалізоване програмне забезпечення.*

***Ключові слова:** мостовий кран, система керування, оптимізація, динамічні зусилля.*

Вступ

Мостові крани знайшли широке застосування у багатьох галузях народного господарства. На даний час значна кількість кранів є технічно застарілими і тому для недопущення їх виходу з ладу необхідно зменшувати навантаження у їхніх елементах. Можливими варіантами подовження їх експлуатації є: використання пристроїв та засобів для зниження динамічних навантажень [1] та модернізація системи керування рухом кранових механізмів, яка полягає у використанні систем частотно-керованого приводу для механізмів підйому вантажу та переміщення крана і кранового візка. При цьому динамічні навантаження у крановому мості, кінцевих балках та елементах приводу зменшуються.

Найбільш навантаженим елементом крана є мостові балки. Оптимальний вибір діаграм розгону та гальмування крана дозволяє мінімізувати небажані динамічні навантаження у цьому елементі. У свою чергу це вимагає синтезу оптимальних законів переміщення крана за певним критерієм.

Зазначимо, що підходи щодо оптимізації режимів руху технічних систем довели свою ефективність, оскільки із їх допомогою вдається знизити динамічні навантаження, збільшити продуктивність та покращити енергоефективність роботи машин і механізмів [2, 3].

Огляд останніх публікацій. Важливим питанням у синтезі законів руху вантажопідйомних машин є вибір критерію оптимізації.

© Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Крушельницький В. В., 2019

Одним із найпоширеніших критеріїв є швидкодія (тривалість виконання перевантажувального циклу). Розв'язок цієї задачі (оптимальне керування) має вигляд релейної функції [4], що спричиняє додаткові навантаження кранового моста.

Очевидно, що для мінімізації небажаних динамічних зусиль необхідно використати критерій, який дає змогу чисельно їх оцінити. Саме такі критерії (у вигляді інтегральних функціоналів) розроблені у роботі [5]. Вони будуть використані у даній статті.

Для зниження динамічних навантажень у крановому мості автори роботи [6] запропонували систему керування краном з використанням нечіткої логіки. Подібні підходи також використані у публікації [7]. Ці результати вимагають застосування систем керування із зворотнім зв'язком.

У науковій публікації [8] для цілей зменшення динамічних навантажень запропоновано використовувати розділений частотно-регульований привід механізму переміщення крана. При цьому необхідно застосовувати зворотний зв'язок за пройденим шляхом для формування керуючого сигналу електроприводам переміщення мостового крана.

Для гасіння пружних коливань у елементах крана автори роботи [9] запропонували модальний регулятор. Для досліджень використана спрощена двомасова динамічна модель, яка дала змогу синтезувати регулятор стану для ефективного гасіння коливань конструкції моста в напрямку його руху.

Автори роботи [10] запропонували оптимізувати перехідний процес пуску двигуна механізму горизонтального переміщення крана шляхом керування приводним моментом двигуна таким чином, щоб забезпечити мінімальний час розгону з усуненням коливання вантажу на гнучкому підвісі.

У вказаних роботах не в повній мірі обґрунтована розробка систем керування рухом крана. На думку авторів даної роботи, вона повинна спиратись на теоретичні положення методів оптимального керування із врахуванням особливостей практичної реалізації керувань сучасними приводними системами.

Мета роботи полягає у розробці системи оптимального керування рухом мостового вантажопідйомного крана, яка дозволяє мінімізувати динамічні зусилля у його мості. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) виконати постановку та знайти розв'язок задачі оптимального керування рухом мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі; 2) розробити апаратне та програмне забезпечення для реалізації системи оптимального керування рухом мостового крана.

Виклад основного матеріалу.

1. Синтез оптимального керування рухом мостового крана

Відомо, що процес переміщення мостового крана супроводжується коливаннями вантажу. Вони викликають додаткові навантаження на мостові балки крана. Тому для подальших досліджень динаміки руху крана використаємо тримасову динамічну модель (рис. 1) мостового крана, яку запропоновано в роботі [11]. В цю модель входять зведені маси: вантажу m , мостової балки крана з візком m_1 та кінцевих балок з приводом m_0 . Зведена маса мостової балки крана і візка з'єднані пружним елементом із жорсткістю c , яка представляє собою зведену жорсткість кранового моста. До зведеної маси приводу і кінцевих балок прикладено рушійне зусилля F_p та сила опору переміщення крана W . Модель (рис. 1) дає змогу досліджувати динамічні навантаження в мостовій балці крана, що викликані пружними коливаннями балки та маятниковими коливаннями вантажу на гнучкому підвісі.

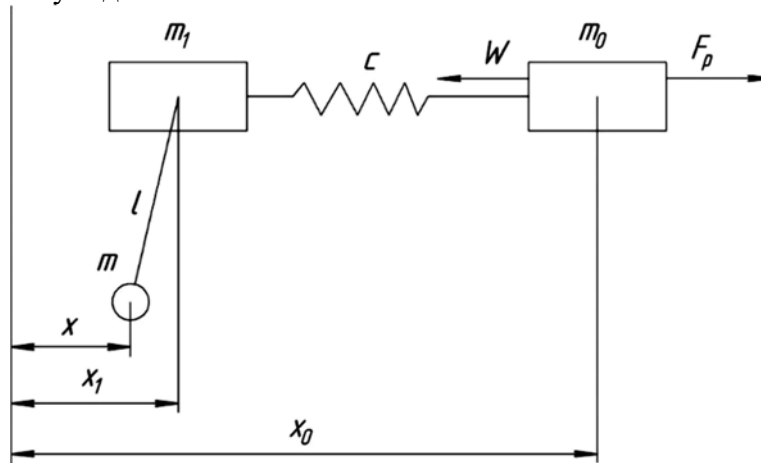


Рисунок 1 – Тримасова динамічна модель мостового крана

На рис. 1 через x , x_0 , x_1 позначені узагальнені координати зведених мас вантажу, приводу із кінцевими балками та кранового візка із мостовою балкою відповідно, а через l – довжина гнучкого підвісу, на якому закріплений вантаж. Динамічна модель (рис. 1) описується наступною системою диференціальних рівнянь [11]:

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

де g – прискорення вільного падіння. Для оптимізації процесу пуску крана з вантажем на гнучкому підвісі використаємо крайові умови:

$$\begin{cases} t = 0; x = x_1 = x_2 = 0; \dot{x} = \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0; \\ t = t_1; x = x_1 = x_2 = \frac{Vt}{2}; \dot{x} = \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = V, \end{cases} \quad (2)$$

які із використанням рівнянь (1) можна записати у такому вигляді:

$$\begin{cases} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0; \\ t = t_1; x = \frac{Vt}{2}; \dot{x} = V; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де t – час; t_1 – тривалість перехідного процесу пуску крана; V – номінальна швидкість руху крана. Крайові умови (3) дають змогу усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі та пружні коливання мостової балки у кінці розгону крана. У якості критерію оптимізації приймемо середньоквадратичне значення інтенсивності зміни зусилля, що діє в мостовій балці крана:

$$\dot{I}_F = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[m_1 \frac{l}{g} \overset{VI}{x} + (m_1 + m) \overset{IV}{x} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Критерій (4) дозволяє зменшити інтенсивність дії динамічних зусиль у мостовій балці. Умовою мінімуму критерію (4) є рівняння Ейлера-Пуасона [12]:

$$(m + m_1) \left[m_1 \frac{l}{g} \overset{X}{x} + (m + m_1) \overset{VIII}{x} \right] + m_1 \frac{l}{g} \left[m_1 \frac{l}{g} \overset{XII}{x} + (m_1 + m) \overset{X}{x} \right] = 0. \quad (5)$$

Після перетворень рівняння (5) набуде вигляду:

$$\overset{XIII}{x} + 2 \frac{m + m_1}{m_1} \cdot \frac{g}{l} \overset{X}{x} + \left[\frac{m + m_1}{m_1} \cdot \frac{g}{l} \right]^2 \overset{VIII}{x} = 0. \quad (6)$$

Для розв'язування рівняння (6) введемо заміну $k = \sqrt{\frac{m + m_1}{m_1} \cdot \frac{g}{l}}$,

тоді можемо записати:

$$\overset{XIII}{x} + 2k^2 \overset{X}{x} + k^4 \overset{VIII}{x} = 0. \quad (7)$$

Для розв'язку рівняння (7) складемо характеристичне рівняння:

$$r^{12} + 2k^2 r^{10} + k^4 r^8 = 0. \quad (8)$$

Його розв'язки мають такий вигляд:

$$\begin{cases} r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = r_7 = r_8 = 0; \\ r_9 = r_{10} = ki; \\ r_{11} = r_{12} = -ki \end{cases} \quad (9)$$

З урахуванням отриманих коренів (9) розв'язок рівняння (7) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} x = & (c_1 + c_2 t) \sin kt + (c_3 + c_4 t) \cos kt + c_5 t^7 + \\ & + c_6 t^6 + c_7 t^5 + c_8 t^4 + c_9 t^3 + c_{10} t^2 + c_{11} t + c_{12}, \end{aligned} \quad (10)$$

де c_1, c_2, \dots, c_{12} – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху (3). Знаходячи постійні інтегрування c_1, c_2, \dots, c_{12} із використанням крайових умов (3) та підставляючи їх у вираз (10), отримуємо загальний розв’язок крайової задачі (3), (7):

$$\begin{aligned}
 x = & (v(1440kT(-2t + T) + 120k^3T^3(-2t + T) + k^7 \cdot t^4T^2(2t^2 - \\
 & - 6tT + 5T^2) - 4k^5t^2(2t^4 - 6t^3T + 15t^2T^2 - 20tT^3 + 15T^4) + \\
 & + 8k(360T(t + T - 30k^2tT^2(3t + 2T) + k^4(t^6 - 3t^5T + 5t^3T^3)) \cdot \\
 & \cdot \cos(kT) + 120T(k(t(-12 + k^2T^2) - T(12 + k^2T^2))\cos(kt) - k \cdot \\
 & \cdot (-12t + 24Tk^2tT^2) \cdot \cos(k(t - T)) + 36 + k^2T(-6t + T))\sin(kt) + \\
 & + (-36 + k^2T(-6t + 5T)) \cdot \sin(k(t - T))) + T(-4320 + 60k^4t^2(t - \\
 & - 3T)(t + T) + k^6t^4(2t^2 - 6tT + 5T^2) + 120k^2(6t^2 + 18tT + 5T^2)) \cdot \\
 & \cdot \sin(kT)) / (2kT(-2880 - 240k^2T - 24k^4T^4k^6T^6 + 24(120 - 50 \cdot \\
 & \cdot k^2T^2 + k^4T^4)\cos(kT) + kT(2880 - 240k^2T^2 + k^4T^4)\sin(kT))).
 \end{aligned} \quad (11)$$

Інші кінематичні та динамічні характеристики руху крана можна отримати з допомогою виразу (11). Вони мають значний об’єм і тому тут не наводяться.

Побудуємо графічні залежності, що відображають кінематичні та динамічні характеристики руху крана при різній тривалості його пуску. Графіки на рис. 2-4 побудовані при умовах $m=20000$ кг, $l=7$ м. З рис. 2-4 видно, що найкращий результат досягається при тривалості розгону крана 7 секунд. Така тривалість пуску крана забезпечує плавне наростання зусилля в мостовій балці (рис. 3, б) та рушійного зусилля (рис. 4, б).

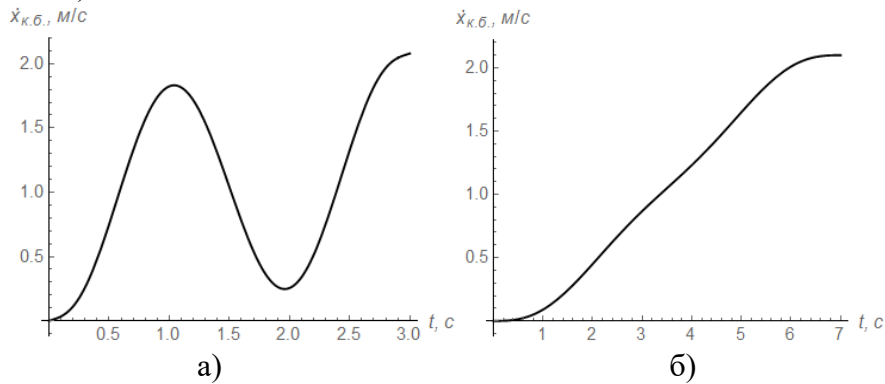


Рисунок 2 – Швидкість зведеної маси кінцевих балок з приводом при тривалості пуску крана: а) 3 секунди; б) 7 секунд

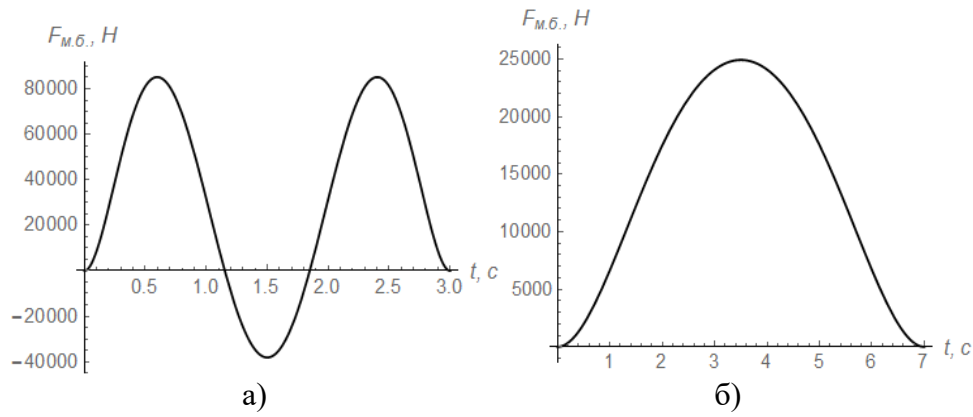


Рисунок 3 – Зведене зусилля в мостовій балці крана при тривалості пуску крана: а) 3 секунди; б) 7 секунд

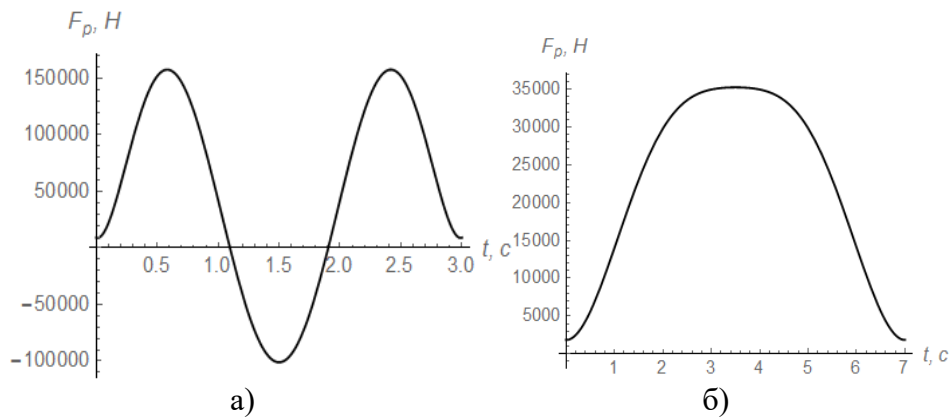


Рисунок 4 – Зведене рушійне зусилля при тривалості пуску крана: а) 3 секунди; б) 7 секунд

Пуск механізму переміщення крана при тривалості 3 секунди супроводжується зміною знаку зусилля в мостовій балці та рушійного зусилля механізму переміщення. Це викликає додаткові динамічні навантаження і тому є небажаним.

2. Розробка системи для реалізації оптимального керування рухом мостового крана

Для реалізації оптимального закону руху мостового крана використовується частотний перетворювач та спеціалізоване програмне забезпечення. Для апаратної частини системи керування було використано частотний перетворювач Mitsubishi FR-E740-060 [13], який разом із іншим обладнанням змонтований у електрошкафі (рис. 5).



Рисунок 5 – Електрошафа з частотним перетворювачем Mitsubishi FR-E740-060

Програмне забезпечення (рис. 6) для керування механізмом переміщення крана розроблено в середовищі Delphi [14]. В програму інтегровано оптимальний закон керування швидкістю руху крана, за яким динамічні навантаження у металоконструкціях зводяться до мінімуму (11).

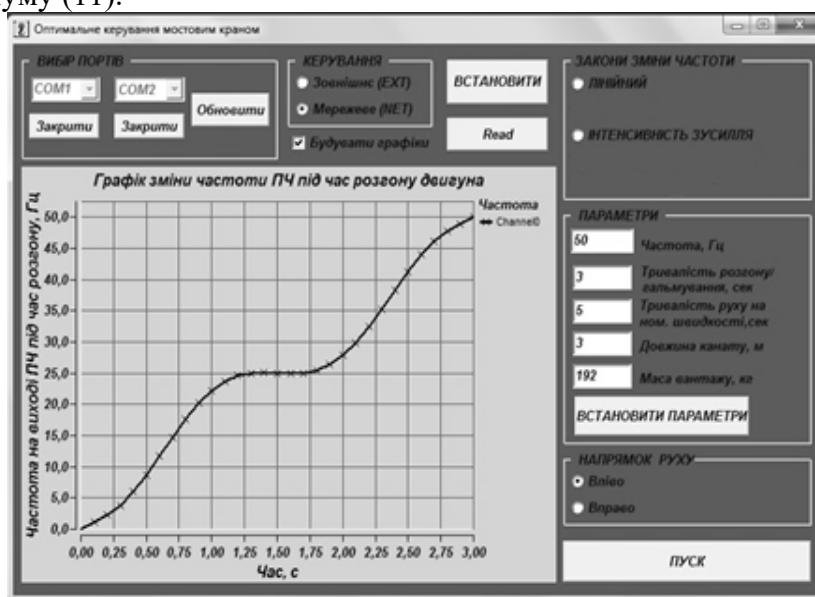


Рисунок 6 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення «Оптимальне керування мостовим краном»

Розроблене програмне забезпечення дає змогу переключити частотний перетворювач у режим NET (мережеве керування через послідовний інтерфейс), вибрати оптимальний закон руху крана, ввести величини маси вантажу, максимальної частоти напруги живлення електродвигуна, тривалості перехідного процесу та тривалості усталеного руху. Після вибору режиму та вводу параметрів, виконується побудова графіка зміни частоти напруги живлення двигуна протягом його пуску. Програмне забезпечення дає змогу реалізувати оптимальні закони із зворотнім зв'язком та без нього.

Програма розраховує масив швидкостей для пуску крана, перетворює його у масив зміни частоти напруги двигуна та передає отримані дані у кодї ASCII [15] через послідовний інтерфейс комп'ютера до частотного перетворювача. Це дає змогу перетворювачу частоти через кожні 0,1 секунди змінювати частоту напруги живлення електродвигуна, що викликає зміну його кутової швидкості. Перехідний процес гальмування відбувається аналогічно процесу пуску, тільки масив даних про частоту відправляється у зворотній послідовності.

Для визначення довжини канату та маси вантажу розроблений мікроконтролерний пристрій (рис. 7), який складається з плати стабілізаторів напруги (для живлення датчиків), мікроконтролера ATMEL ATmega 328 [16], 24-х бітного аналого-цифрового перетворювача HX711 [17] та розробленого програмного коду в інтегрованому середовищі розробки Arduino.

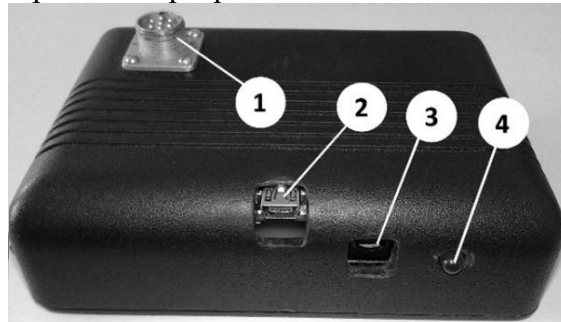


Рисунок 7 – Зовнішній вигляд блоку зворотного зв'язку: 1 – роз'єм для підключення датчиків; 2 – роз'єм USB, для підключення до комп'ютера; 3 – роз'єм для підключення живлення; 4 – індикатор включення блоку зворотного зв'язку

До блоку підключається S-подібний тензодатчик, енкадер Autonics ENC-1-1-t-24 та кінцевий вимикач. У якості перетворювача інтерфейсів використовується мікросхема FT232 [18] (розташована на платі Arduino NANO 3.0), яка дає змогу підключити мікроконтроллер до комп'ютера через інтерфейс USB. Для живлення датчиків плата стабілізаторів напруги має два виходи стабілізованої напруги: 5В для

живлення тензодатчика та регульований вихід 1,2...35В для живлення енкодера.

Канал регульованої напруги дає змогу підключати енкодери з різними напругами живлення. Напруга на регульованому виході змінюється за допомогою змінного резистора, який розташований безпосередньо на платі стабілізаторів напруги. На корпусі блока розташований світлодіод, який сигналізує підключення напруги живлення.

При розробці програми для блоку зворотного зв'язку використана бібліотека для аналого-цифрового перетворювача hx711.h [19], яка дає змогу зчитувати данні за допомогою функції `scale.get_units()` [20] з модуля HX711 через послідовну синхронну шину I²C. Схему підключення модуля зображено на рис. 8.

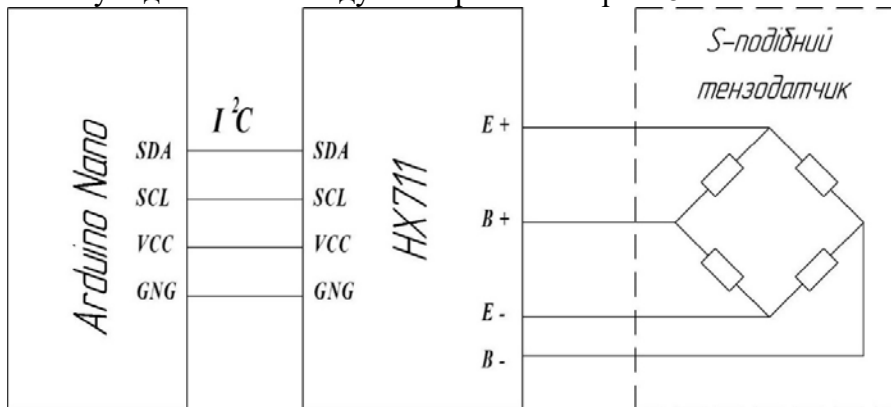


Рисунок 8 – Схема підключення 24-х бітного аналого-цифрового перетворювача HX711 до плати Arduino Nano

Мікроконтролерний пристрій визначає довжину канату за допомогою енкодера змонтованого на крановому візку. Данні зчитуються мікроконтролером за допомогою цифрових входів мікроконтролера та відповідають фактичному значенню положення вантажу відносно кранового візка. Маса вантажу визначається за допомогою S-подібного тензометричного датчика, який монтується у одну гілку канату. Для обнулення числового значення положення вантажу використовується кінцевий вимикач ME-8107, який кріпиться на вантажному канаті. При досягненні мінімально допустимого значення довжини канату замикається кінцевий вимикач. При цьому мікроконтролеру відправляється цифровий сигнал, який викликає присвоєння цифровій змінній, яка позначає довжину каната, початкового значення довжини канату.

Для передачі параметрів, які зчитались з датчиків, необхідно у програмі «Оптимальне керування мостовим краном» натиснути кнопку «Read». Після цього на мікроконтролер через USB-UART конвертер (мікросхема FT232) відправляється запит. Дані, що отримані з

енкодера та тензометричного датчика, через мікроконтролер передаються до комп'ютера і відображаються на відповідних полях «Довжина канату, м» і «Маса вантажу, кг».

Отримані данні з датчиків дають змогу проводити розрахунки для визначення розгінних та гальмівних характеристик електропривода при реалізації оптимального керування рухом мостового крана.

Висновки.

1. У статті розроблено підхід щодо мінімізації динамічних навантажень у балці мостового крана. Його сутність полягає у синтезі оптимального керування рухом крана із використанням його математичної моделі, критерію оптимізації та заданих крайових умов руху зведених мас системи із подальшою реалізацією керування мікроконтролерними засобами та високоефективними частотнокерованими приводами.
2. Результати теоретичних досліджень задачі оптимального керування мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі показали, що зусилля, які виникають у мостовій балці крана зводяться до мінімуму при оптимізації за критерієм середньоквадратичного значення інтенсивності зміни зусилля у балці. Таке керування забезпечує плавне наростання кінематичних та динамічних характеристик крана. Встановлено, що небажана зміна знаку вказаних характеристик виникає лише при тривалості розгону 3 секунди і менше.
3. Для реалізації оптимальних законів руху розроблено мікроконтролерний пристрій, який дає змогу визначати довжину гнучкого підвісу та масу вантажу за допомогою датчиків та відправляти отримані данні до комп'ютера для подальших розрахунків масиву швидкості крана під час його перехідних процесів (пуск/гальмування).
4. Розроблено програмне забезпечення для керування електроприводом механізму переміщення крана, що дає змогу реалізувати синтезований оптимальний закон руху крана із використанням частотного перетворювача. Останній виступає як джерело живлення приводу механізму переміщення крана.

Список використаних джерел:

1. The Crane's vibrating systems controlled by mechatronic devices with magnetorheological fluid: the nonlinear mathematical model of behavior and optimization of work regimes / V.S. Loveikin, A.P. Liashko, Y.V. Chovnyuk // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2014. – №6. – P. 97-102.
2. Synthesis of Camshaft Driving Mechanism in Roller Molding Installation with Combined Motion Mode according to Acceleration

- of Third Order / V.S. Loveikin, K.I. Pochka // Science & Technique. – 2017. – Vol. 16. – Issue. 3. – P. 206-214.
3. Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode / V.S. Loveikin, Yu.O. Romaseych // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2017. – №6. – P. 97-102.
 4. Time-Optimal Control of a Simple Pendulum with a Movable Pivot. Part 1/ V.S. Loveikin, Y.A. Romasevich, A.S. Khoroshun, A.G. Shevchuk // International Applied Mechanics. – 2018. – Vol. 54. – Issue 3. – P. 358-365.
 5. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин. – К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
 6. Szpytko J., Smoczek J., Łakomski D. Adaptive control system of overhead crane's movement mechanisms / URL: pdfs.semanticscholar.org/fb50/79e644e7610c446ea07e1f5ae39f7a923737.pdf (дата звернення 22.02.2019).
 7. Петренко Ю.Н. Исследование работы мостового крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ., 2011. – Вып. 3. – С. 20-25.
 8. Стрижак В.В. Особливості виникнення і усунення перекосів мостових кранів з роздільним частотно-регульованим приводом механізму пересування / В.В. Стрижак // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво, 2012. – Вып. 1. – С. 61-66.
 9. Толочко О.И. Гашения горизонтальных упругих колебаний конструкции мостового крана. / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин., Ф.Палис // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Теорія і практика. Тематичний випуск. – Кременчук, 2012. – Вып. 3(19). – С. 336-339.
 10. Найденко Е.В. Управление электроприводом механизмов горизонтального перемещения с подвешенным грузом / Е.В. Найденко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2007. – Вып. 69. – С. 17-22.
 11. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины / В.Ф. Гайдамака. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
 12. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
 13. Inverter FR-E700 instruction manual (Basic) / URL: <http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/ib0600441eng/ib0600441enga.pdf> (дата звернення 22.02.2019).

14. Галисиев Г.В. Компоненты в Delphi 7. Профессиональная работа / Г.В. Галисиев. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 624 с.
15. ASCII Table and Description / URL: <http://www.asciitable.com/> (дата звернення 22.02.2019).
16. ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH / URL: http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf (дата звернення 22.02.2019).
17. 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales / URL: https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf (дата звернення 22.02.2019).
18. Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC/URL: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf (дата звернення 22.02.2019).
19. Weigh Objects with an Arduino Scale / URL: <https://create.arduino.cc/projecthub/team-arduinotronics/arduino-scale-b821ae> (дата звернення 22.02.2019).
20. Make your weighing scale hack using arduino and hx711 / URL: <http://www.instructables.com/id/Make-your-weighing-scale-hack-using-arduino/?ALLSTEPS> (дата звернення 22.02.2019).

SYSTEM OF OPTIMAL CONTROL OF BRIDGE CRANE MOVEMENT

Loveikin V., Romasevych Yu., Krushelnitsky V.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Abstract. The article is devoted to the optimization of the control of movement of a crane with a load on a flexible suspension. In order to state the problem, an integral criterion has been used which reflects unwanted system's features. In order to carry out the calculations, the mathematical three-mass model of the crane movement has been used. It takes into account the oscillation of the load and elastic vibrations of the crane metal construction. The optimization problem also takes into account the boundary conditions of the reduced masses of the crane and a load, which ensure the elimination of the load oscillations (the boundary conditions correspond to the crane acceleration). The solution of the problem has been found using the classical variational calculus: the necessary minimum condition for an integral functional – the Euler-Poisson equation has been found. It is represented by a homogeneous differential equation of the twelfth order. The solution of the equation has been found in analytical form. The performed analysis of the results of the problem solution shows

that the level of dynamic forces in the elements of the crane is insignificant. In addition, the effect of the duration of the controlled mode of motion on level of dynamic forces is established.

The realization of optimal control has been carried out by modern means of microelectronics and a controlled electric drive. In order to take into account the variations of the system "crane-load" parameters a close-loop block has been developed. It allows obtaining information from sensors of the length of the flexible suspension, weight of a load and operatively transmitting data to the system's microcontroller. Specialized software has been developed. It allows, taking into account the actual parameters of the controlled system, to calculate the optimal modes of starting and stopping of the crane. Another function of the developed software is to control the frequency converter, which acts as a power source for the electric drive crane movement mechanism. It has been implemented by sending to the frequency inverter control signals in relation to the power supply voltage frequency of the drive motor.

Key words: bridge crane, system of control, optimization, dynamic forces.