

УДК 621.87

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПОВОРОТУ СТРІЛОВОГО КРАНА ЗА КРИТЕРІЄМ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ПРИШВИДШЕННЯ ЗМІНИ ЗУСИЛЛЯ В ПРИВОДНОМУ МЕХАНІЗМІ

В. С. Ловейкін<sup>1</sup>, Ю. О. Ромасевич<sup>1</sup>, А. В. Ловейкін<sup>2</sup>, І. О. Кадикало<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.

*Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.*

*Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net, kadykaloivan@nubip.edu.ua.*

*Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – серпень 2019.*

*Бібл. 23, рис. 6, табл. 2.*

**Анотація.** На основі попереднього динамічного аналізу виявлено, що під час роботи механізму повороту баштового крана виникають коливання вантажу та значні динамічні навантаження в елементах конструкції та приводу. Ці явища виникають під час перехідних режимів руху (пуску та гальмування). Для їх мінімізації проведено оптимізацію процесу пуску за певним оптимізаційним критерієм. В даній статті розв'язана задача оптимізації режиму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі. Розв'язок варіаційної задачі отриманий у вигляді функціональних залежностей режиму руху окремих ланок механізму повороту баштового крана, який представлений у графічному вигляді.

Отримані закони руху за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі (режим 2) мають значні переваги порівняно з законами руху за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі (режим 1). В результаті проведеного аналізу було виявлено, що за режиму 2 максимальні та середньоквадратичні значення більшості кінематичних і силових характеристик приймають менші значення в порівнянні з режимом 1, по деяких показниках ці параметри рівнозначні. Однак характер зміни цих показників при режимі 2 має плавний вигляд. Отриманий оптимальний режим руху механізму повороту крана дозволяє усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі під час роботи механізму повороту, а також зменшити динамічні навантаження в приводі та металоконструкціях крана.

Слід зазначити, що використання оптимальних законів руху дає можливість значно підвищити надійність та продуктивність роботи крана і зменшити аварійні ситуації під час виконання розвантажувально-навантажувальних операцій. Реалізація отриманих оптимальних режимів руху здійснюється за допомогою мехатронних пристроїв системи керування приводним механізмом.

**Ключові слова:** баштовий/стріловий кран, механізм повороту, вантаж, обертання, динамічні навантаження, оптимізація, мінімізація, критерій, зусилля, коливання, пружний момент, зміна швидкості, прискорення, оптимальне керування.

### Постановка проблеми

При роботі механізму обертання стрілового крана в його елементах та металоконструкції крана виникають значні динамічні навантаження [1-9], які є причиною обмеження робочих швидкостей і, як наслідок, зменшення продуктивності виконання навантажувально-розвантажувальних операцій. Крім того, наявність динамічних навантажень приводить до зменшення надійності роботи механізму обертання і крана в цілому [10-13]. Значно зменшити ці динамічні навантаження можна шляхом вибору режиму руху приводу механізму повороту крана на ділянках перехідних процесів (пуск, гальмування).

Необхідний режим обертання крана може бути вибраний шляхом оптимізації перехідних процесів з використанням тих або інших критеріїв взаємності від поставлених задач проектування крана або умов його використання [21]. Для зменшення динамічних навантажень в елементах механізму повороту крана необхідно вибирати критерії, які відображають дію цих навантажень протягом певного проміжку часу роботи крана. Такими критеріями можуть бути середньоквадратичні значення динамічних навантажень та їхніх похідних за часом протягом проходження перехідних процесів [22-24].

Особливо небезпечними є навантаження, які змінюються з часом і приводять до виникнення коливань в елементах механізму обертання, металоконструкції крана та вантажу на гнучкому підвісі. Тому при оптимізації режиму повороту необхідно обирати в якості критеріїв оптимізації середньоквадратичні значення навантажень коливального характеру.

### Аналіз останніх досліджень

При роботі механізму обертання стрілового крана спостерігаються значні розгойдування вантажу на гнучкому підвісі та коливання елементів приводу і конструкції [1-9]. Наявність цих коливань приводить до нерівномірності руху елементів приводу механізму повороту, що впливає на якість виконання навантажувально-розвантажувальних операцій, продуктивність та надійність роботи крана, а також збільшує імовірність виникнення аварійних ситуацій [10-13].

Покращення конструктивних та експлуатаційних характеристик механізму обертання і крана в цілому досягається за рахунок оптимізації [14-16]. В роботі [17] запропонована методика зменшення відкладень корисного навантаження з використанням намотування і розмотування підйомного канату. Зменшення коливань вантажу та динамічних навантажень представлено різними методами та підходами [18, 19]. В роботі [20] показані результати аналітичних та чисельних досліджень управління плоскими коливаннями крана великої амплітуди. Пропонується та описується нова концепція, яка називається механічним фільтром. Інші підходи ґрунтуються на оптимізації режимів руху на ділянках пуску та гальмування [21]. При оптимізації режимів руху кранових механізмів виникає проблема вибору критеріїв оптимізації [22-24]. Найбільш доцільно вибирати критерії інтегрального характеру, які оцінюють роботу крана або його окремого механізму протягом певної ділянки руху. В якості таких критеріїв використовувались критеріальні дії, які представляють собою інтегральні функціонали [25-27]. Також до інтегральних критеріїв відносяться середньоквадратичні значення діючих динамічних навантажень та їхні похідні за часом [26, 27].

Серед методів оптимізації режимів руху слід виділити методи варіаційного числення, динамічного програмування та принцип максимуму. Для критеріїв, які відображають середньоквадратичні значення діючих навантажень та їхніх похідних за часом доцільно використовувати варіаційні методи оптимізації, оскільки вони забезпечують достатньо високий рівень плавності режимів руху елементів кранових механізмів [22-28].

### Мета досліджень

Мета роботи полягає в оптимізації режиму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі. Досягти поставленої мети можливо за рахунок вирішення наступних задач: 1) побудувати математичну модель механізму повороту стрілового крана [1];

2) обрати критерій оптимізації режиму повороту крана та встановити умови його мінімуму, зокрема крайові умови; 3) визначити оптимальний режим руху механізму повороту; 4) провести аналіз отриманих результатів.

### Результати досліджень

Механізм повороту крана представлено у вигляді динамічної моделі (рис. 1) [1]. При побудові динамічної моделі вважаємо, що усі елементи механізму повороту тверді тіла, окрім елементів передавального механізму приводу, а вантажний канат представляється гнучкою нерозтяжною ниткою. При цьому нехтуємо радіальними відхиленнями каната від вертикалі, викликаними відцентровими силами, а враховуємо лише відхилення в дотичному напрямку руху вантажу по колу.

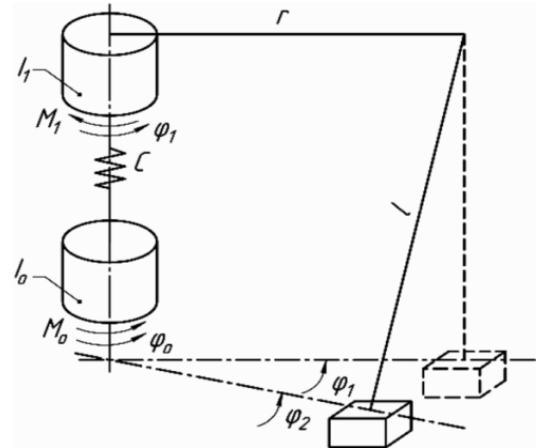


Рис. 1. Динамічна модель механізму повороту.  
Fig. 1. Dynamic model of the turning mechanism.

За узагальнені координати динамічної моделі прийняті кутові координати повороту зведеної до осі повороту крана маси елементів приводу  $\varphi_0$ , поворотної башти зі стрілою відносно власної осі обертання  $\varphi_1$  та вантажу  $\varphi_2$ .

Рівняння руху, що відповідають цій моделі, мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} I_0 \ddot{\varphi}_0 = M_0 - C \cdot (\varphi_0 - \varphi_1); \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = C \cdot (\varphi_0 - \varphi_1) - m r^2 \frac{g}{l} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_1; \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{g}{l} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2), \end{cases} \quad (1)$$

де  $m$  – маса вантажу;  $I_0$  – момент інерції приводного механізму, зведений до осі повороту крана;  $I_1$  – момент інерції поворотної частини крана;  $M_0$  – рушійний момент двигуна, зведений до осі повороту крана;  $M_1$  – момент опору в поворотній частині крана;  $C$  – коефіцієнт жорсткості приводного механізму, зведений до вісі повороту крана;  $r$  – довжина стріли;  $l$  – довжина гнучкого підвісу вантажу;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

За критерій оптимізації режиму повороту стрілового крана оберемо значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі. Виконавши певні математичні дії знайдемо пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі

$$\ddot{M}_{01} = I_1 \cdot \frac{l}{g} \cdot \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right), \quad (2)$$

де  $k = \sqrt{\frac{I_1 + mr^2}{I_1 \cdot l/g}}$  – частота власних коливань системи.

Тоді критерій оптимізації режиму повороту крана матиме вигляд

$$\ddot{M}_{01ck} = \left[ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \ddot{M}_{01}^2 dt \right]^{1/2},$$

$$\ddot{M}_{01ck} = \left[ \frac{1}{t_1} \left( I_1 \frac{l}{g} \right)^2 \int_0^{t_1} \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right)^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $t$  – час;  $t_1$  – тривалість перехідного процесу (пуску, гальмування).

Мінімум критерію (3) визначається мінімумом інтеграла

$$i = \int_0^{t_1} \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right)^2 dt. \quad (4)$$

Якщо позначити

$$f = \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right)^2, \quad (5)$$

то умовою мінімуму інтеграла (4) буде рівняння Пуассона

$$\frac{d^4}{dt^4} \frac{df}{d\varphi_2} + \frac{d^6}{dt^6} \frac{df}{d\varphi_2} = 0. \quad (6)$$

Після знаходження необхідних похідних для (6)

$$\frac{df}{d\varphi_2} = 2k^2 \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right);$$

$$\frac{df}{d\varphi_2} = 2 \left( \frac{VI}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right);$$

$$\frac{d^4}{dt^4} \frac{df}{d\varphi_2} = 2k^2 \left( \frac{X}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right);$$

$$\frac{d^6}{dt^6} \frac{df}{d\varphi_2} = 2 \left( \frac{XII}{\varphi_2 + k^2 \cdot \varphi_2} \right)$$

отримаємо умову мінімуму для критерію (3)

$$\frac{XII}{\varphi_2} + 2k^2 \frac{X}{\varphi_2} + k^4 \frac{VIII}{\varphi_2} = 0. \quad (7)$$

Розв'язок диференційного рівняння (7) має вигляд

$$\varphi_2 = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4 + C_6 t^5 + C_7 t^6 + C_8 t^7 + (C_9 + C_{10} t) \sin kt + (C_{11} + C_{12} t) \cos kt \quad (8)$$

де  $C_i (i=1,2,\dots,12)$  – постійні, які визначаються з крайових умов руху.

Для визначення постійних  $C_i (i=1,2,\dots,12)$  використаємо крайові умови руху:

$$\begin{cases} t=0: \varphi_0 = \varphi_1 = \varphi_2 = 0; \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0; \\ t=t_1: \varphi_0 = \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\omega_y t_1}{2}; \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \omega_y, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\omega_y$  – усталена швидкість повороту крана.

Зведемо умови (9) до координати  $\varphi_2$  та її похідних за часом, в результаті чого отримаємо:

$$\begin{cases} t=0: \varphi_2 = \dot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}_2 = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_2} = \overset{V}{\ddot{\varphi}_2} = 0, \varphi_2 = -\frac{M_1 g}{I_1 l}; \\ t=t_1: \varphi_2 = \frac{\omega_y t_1}{2}, \dot{\varphi}_2 = \omega_y, \ddot{\varphi}_2 = \overset{V}{\ddot{\varphi}_2} = \overset{IV}{\ddot{\varphi}_2} = 0, \varphi_2 = -\frac{M_1 g}{I_1 l}. \end{cases} \quad (10)$$

Розв'язок (8) рівняння (7) містить 12 довільних сталих  $C_i (i=1,2,\dots,12)$  і для їхнього визначення заданих крайових умов (10) достатньо.

Крайові умови (10) визначають бажану залежність  $\varphi_2(t)$  з сімейства (8).

Оскільки в умови (10) входять похідні за часом від функції (8) включно до п'ятого порядку, то запишемо ці залежності:

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2 + 4C_5 t^3 + 5C_6 t^4 + 6C_7 t^5 + 7C_8 t^6 + \\ &+ (C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t) \sin kt + (C_{12} + C_9 k + C_{10} k t) \cos kt; \\ \dot{\varphi}_2 &= 2C_3 + 6C_4 t + 12C_5 t^2 + 20C_6 t^3 + 30C_7 t^4 + 42C_8 t^5 - \\ &- (2C_{12} + C_9 k + C_{10} k t) k \sin kt + (2C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t) k \cos kt; \\ \ddot{\varphi}_2 &= 6C_4 + 24C_5 t + 60C_6 t^2 + 120C_7 t^3 + 210C_8 t^4 - \\ &- (3C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t) k^2 \sin kt - \\ &- (3C_{12} + C_9 k + C_{10} k t) k^2 \cos kt; \\ \overset{IV}{\ddot{\varphi}_2} &= 24C_5 + 120C_6 t + 360C_7 t^2 + 840C_8 t^3 + \\ &+ (4C_{12} + C_9 k + C_{10} k t) k^3 \sin kt - \\ &- (4C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t) k^3 \cos kt; \\ \overset{V}{\ddot{\varphi}_2} &= 120C_6 + 720C_7 t + 2520C_8 t^2 + \\ &+ (5C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t) k^4 \sin kt + \\ &+ (5C_{12} + C_9 k + C_{10} k t) k^4 \cos kt \end{aligned} \quad (11)$$

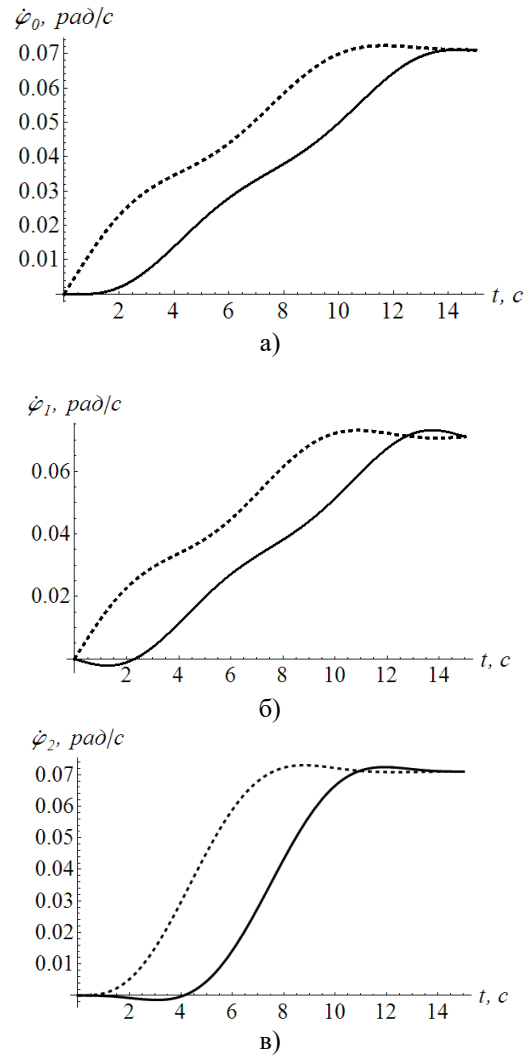
Підставляючи крайові умови (10) в залежності (8) та (11), отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення постійних  $C_i (i=1,2,\dots,12)$ , які забезпечують оптимальний режим повороту стрілової системи крана за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зусилля в пружній системі приводного механізму:

$$\begin{aligned} C_1 + C_{11} &= 0; \quad C_2 + C_{12} + C_9 k = 0; \quad 2C_3 + (2C_{10} - C_{11} k) k = 0; \\ 6C_4 - (3C_{12} + C_9 k) k^2 &= 0; \\ 24C_5 - (4C_{10} - C_{11} k) k^3 &= -\frac{M_1 g}{I_1 l}; \\ 120C_6 + (5C_{12} + C_9 k) k^4 &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& C_1 + C_2 t_1 + C_3 t_1^2 + C_4 t_1^3 + C_5 t_1^4 + C_6 t_1^5 + C_7 t_1^6 + C_8 t_1^7 + \\
& + (C_9 + C_{10} t_1) \sin kt_1 + (C_{11} + C_{12} t_1) \cos kt_1 = \frac{\omega_y t_1}{2}; \\
& C_2 + 2C_3 t_1 + 3C_4 t_1^2 + 4C_5 t_1^3 + 5C_6 t_1^4 + \\
& + 6C_7 t_1^5 + 7C_8 t_1^6 + (C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t_1) \sin kt_1 + \\
& + (C_{12} + C_9 k + C_{10} k t_1) \cos kt_1 = \omega_y; \\
& 2C_3 + 6C_4 t_1 + 12C_5 t_1^2 + 20C_6 t_1^3 + 30C_7 t_1^4 + \\
& + 42C_8 t_1^5 - (2C_{12} + C_9 k + C_{10} k t_1) k \sin kt_1 + \\
& + (2C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t_1) k \cos kt_1 = 0; \\
& 6C_4 + 24C_5 t_1 + 60C_6 t_1^2 + 120C_7 t_1^3 + 210C_8 t_1^4 - \\
& - (3C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t_1) k^2 \sin kt_1 - \\
& - (3C_{12} + C_9 k + C_{10} k t_1) k^2 \cos kt_1 = 0; \\
& 24C_5 + 120C_6 t_1 + 360C_7 t_1^2 + 840C_8 t_1^3 + \\
& + (4C_{12} + C_9 k + C_{10} k t_1) k^3 \sin kt_1 - \\
& - (4C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t_1) k^3 \cos kt_1 = -\frac{M_1 g}{I_1 l}; \\
& 120C_6 + 720C_7 t_1 + 2520C_8 t_1^2 + \\
& + (5C_{10} - C_{11} k - C_{12} k t_1) k^4 \sin kt_1 + \\
& + (5C_{12} + C_9 k + C_{10} k t_1) k^4 \cos kt_1 = 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

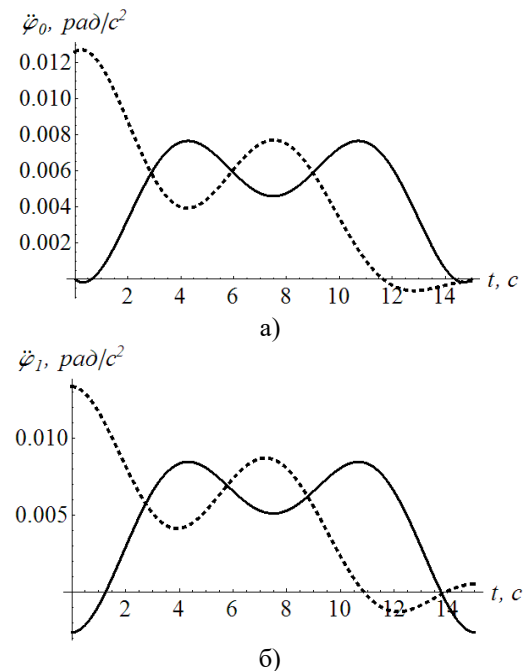
Для механізму повороту стрілового крана QTZ-80 з параметрами  $I_o = 71626,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $I_1 = 4920738,85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $C = 6626669,045 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ ;  $m = 2000 \text{ кг}$ ;  $r = 40 \text{ м}$ ;  $l = 30 \text{ м}$ ;  $M_1 = 1288,79 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_H = 36,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $u = 1355,2$ ;  $\eta = 0,86$ ;  $\omega_y = 0,071 \text{ рад/с}$ ;  $t_1 = 15 \text{ с}$ ;  $\omega_o = 95 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_n = 95,04 \text{ рад/с}$ ;  $\lambda = 2,8$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  в результаті розв'язку системи (12) визначені постійні  $C_i (i=1,2,\dots,12)$ , на основі яких встановлено оптимальний режим повороту крана та побудовано графічні залежності, котрі порівняно з оптимальним режимом повороту за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі (рис. 2 – рис. 6) на цих рисунках прийняті позначення: (---) оптимальне керування 1 (критерій середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі); (—) оптимальне керування 2 (критерій середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі).

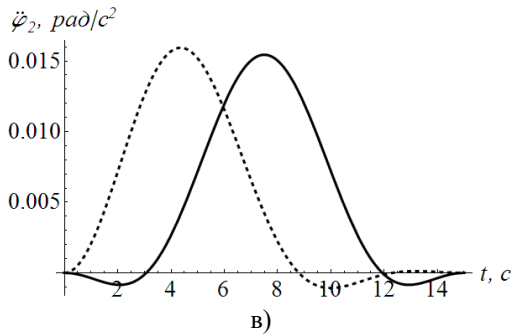
З отриманих графічних залежностей (рис. 2 – рис. 6) можна бачити, що практично усі кінематичні, силові та енергетичні характеристики стрілової системи на ділянці пуску механізму повороту при першому та другому оптимальних режимах руху мають плавний характер зміни, що вказує на відсутність значних динамічних навантажень.



**Рис. 2.** Залежності зміни кутових швидкостей: а) ротора двигуна; б) поворотної частини крана; в) вантажу

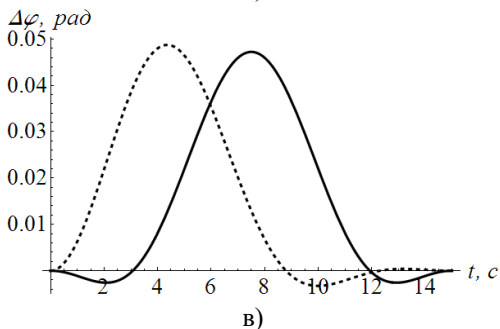
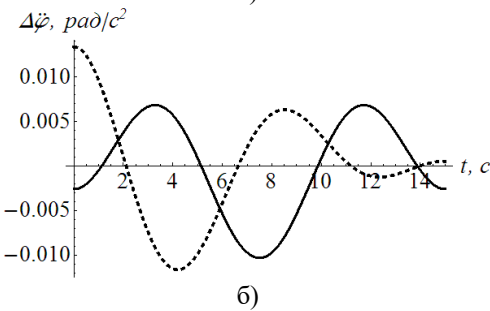
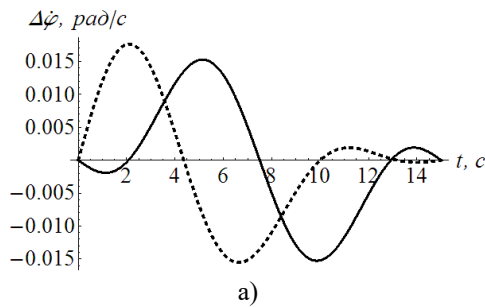
**Fig. 2.** Variation of angular velocity.





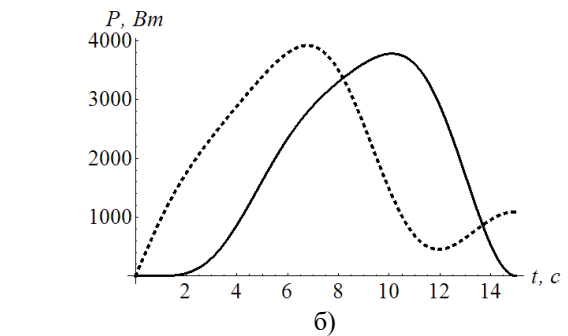
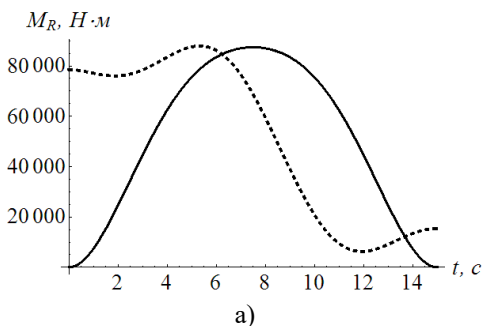
**Рис. 3.** Залежності зміни кутових прискорень: а) ротора двигуна; б) поворотної частини крана; в) вантажу

**Fig. 3.** Variation of the angular accelerations.



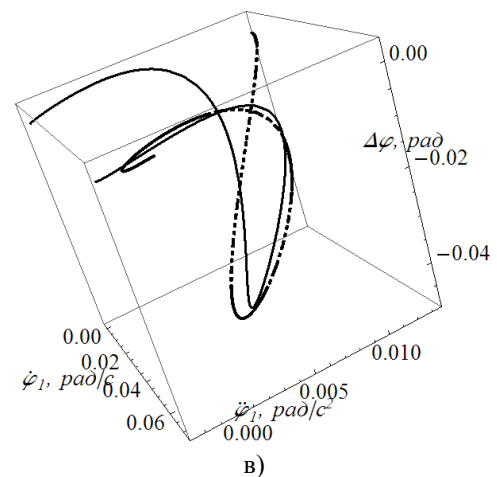
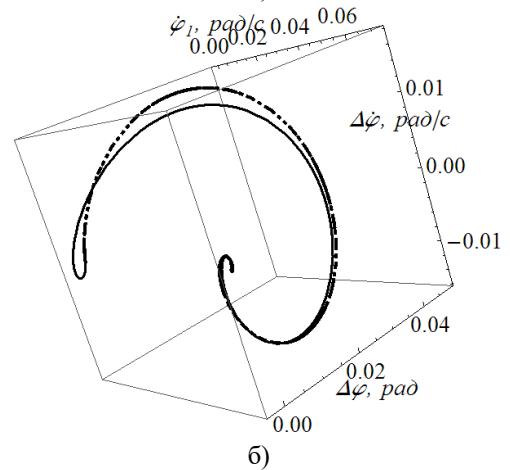
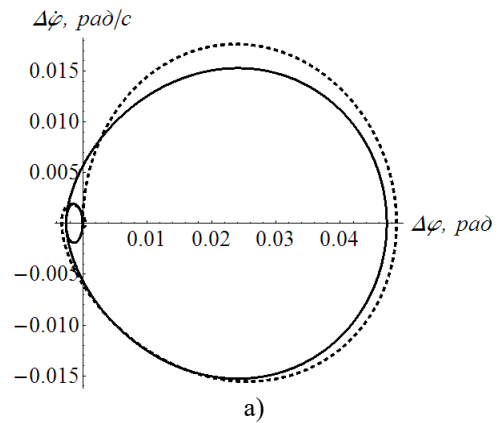
**Рис. 4.** Залежності зміни: а) кутової швидкості; б) кутового прискорення; в) кутової координати відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі.

**Fig. 4.** Variation



**Рис. 5.** Залежності зміни: а) пружного моменту в приводі; б) потужності приводу.

**Fig. 5.** Variation



**Рис. 6.** Фазові портрети: а) плоский; б) і в) об'ємні.

**Fig. 6.** Phase portraits

Здійснено порівняння отриманих оптимальних силових та енергетичних характеристик стрілової режимів руху за середньоквадратичними (табл. 1) та системи. максимальними (табл. 2) значеннями кінематичних,

**Таблиця 1.** Характеристики механізму повороту за середньоквадратичним відхиленням.

**Table 1.** Characteristics of the mechanism of rotation standard deviation.

Характеристики		Середньоквадратичне відхилення		Зменшення характеристик
		Оптимальне керування 1	Оптимальне керування 2	
Кутова швидкість, $рад/с$	ротора двигуна	0,054	0,043	1,26
	поворотної частини	0,055	0,044	1,25
	вантажу	0,058	0,047	1,23
	відхилення вантажу	0,009	0,009	0
Кутове прискорення, $рад/с^2$	ротора двигуна	0,006	0,005	1,2
	поворотної частини	0,006	0,006	0
	вантажу	0,008	0,008	0
	відхилення вантажу	0,006	0,005	1,2
Момент, $Н\cdot м$	двигуна	60883,9	60118,1	1,013
	в приводі	60482,9	59751,9	1,012
Потужність привода, $Вт$		2348,89	2312,24	1,016
Відхилення вантажу, $рад$		0,023	0,023	0

Аналіз середньоквадратичних значень показників з табл. 1 показує, що кінематичні характеристики стрілової системи при використанні критерію середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі є дещо кращими в порівнянні з використанням критерію середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі. Оптимальний режим 2 в порівнянні з режимом 1 дав

можливість зменшити показники середньоквадратичних значень швидкостей ротора двигуна на 26%, поворотної частини крана на 25% та вантажу на 23%, а кутових пришвидшень ротора двигуна та відхилення вантажу на 20%. При цьому відхилення середньоквадратичних значень моментів на валу електродвигуна та приводному механізмі, а також потужності привода є незначними і складають відповідно 1,3%, 1,2%, 1,6%.

**Таблиця 2.** Характеристики механізму повороту за максимальними значеннями.

**Table 2.** Characteristics of the turning mechanism with the highest values.

Характеристики		Максимальні значення		Зменшення характеристик
		Оптимальне керування 1	Оптимальне керування 2	
Кутова швидкість, $рад/с$	ротора двигуна	0,0725	0,071	1,02
	поворотної частини	0,073	0,073	0
	вантажу	0,073	0,072	1,014
	відхилення вантажу	0,0165	0,0151	1,093
Кутове прискорення, $рад/с^2$	ротора двигуна	0,0127	0,0077	1,65
	поворотної частини	0,0135	0,0085	1,59
	вантажу	0,016	0,0154	1,039
	відхилення вантажу	0,013	0,010	1,3
Момент, $кН\cdot м$	двигуна	89	88	1,011
	в приводі	89	88	1,011
Потужність привода, $кВт$		3,9	3,8	1,026
Відхилення вантажу, $рад$		0,049	0,047	1,043

Аналіз максимальних значень характеристик з табл. 2 також показує деяке покращення показників при використанні критерію середньоквадратичного значення пришвидшення зміни пружного моменту в

приводному механізмі в порівнянні з критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни цього моменту. Так, наприклад, покращились значення кутових швидкостей ротора двигуна на

2,0%, відхилення вантажу на 9,3%, а також кутових пришивдшень ротора двигуна на 65%, поворотної частини крана на 59% та відхилення вантажу на 30%.

Разом з тим, такі показники як максимальні значення моментів на валу двигуна та в приводному механізмі, а також потужності двигуна практично є ідентичними при обох оптимальних режимах руху механізму повороту. Відхилення цих показників знаходиться в межах 1,1%...2,6%.

З отриманого аналізу можна зробити висновок, що практично за всіма показниками оптимізація режиму пуску механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пришивдшення зміни пружного моменту в приводному механізмі має переваги перед оптимізацією за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни моменту в приводі. Деякі з показників оцінки режимів руху є рівнозначними. До цих показників відносяться як максимальні, так і середньоквадратичні значення силових та енергетичних характеристик.

Наведені фазові портрети (рис. 6) показують, що контури фазових траєкторій як першого, так і другого оптимальних режимів руху є замкненими, що вказує на відсутність коливань в елементах приводу та вантажу на гнучкому підвісі після процесів пуску.

### Висновки

1. В результаті динамічного аналізу механізму повороту стрілового крана встановлено, що в елементах приводу та металоконструкцій з вантажем на гнучкому підвісі під час процесу пуску виникають динамічні навантаження, які значно перевищують навантаження в процесі усталеного руху.

2. Для зменшення динамічних навантажень в елементах приводу та металоконструкцій проведено оптимізацію режиму руху в процесі пуску за інтегральними динамічними критеріями (середньоквадратичними значеннями швидкості та пришивдшення зміни пружного моменту в приводному механізмі). Проведена оптимізація дозволила усунути коливання в елементах приводу та вантажу на гнучкому підвісі, а також значно зменшити величину навантажень.

3. Проведено порівняльний аналіз оптимальних режимів руху за критеріями середньоквадратичних значень швидкості та пришивдшення зміни пружного моменту приводу. З проведеного аналізу встановлено, що кожний з оптимальних режимів руху значно зменшує динамічні навантаження в елементах приводу та конструкції крана в порівнянні зі звичайним «ручним» керуванням. З двох оптимальних режимів руху в процесі пуску слід віддати перевагу режиму руху за критерієм середньоквадратичного значення пришивдшення зміни моменту в приводі, оскільки практично усі кінематичні, силові та енергетичні характеристики є кращими в порівнянні з режимом за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни моменту в приводі.

### Список літератури

1. Ловейкін В.С., Пилипака С.Ф., Кадикало І.О. Динамічний аналіз механізму повороту стрілового крана. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. Київ. 2017. Вип. 258. С. 192–202.
2. Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Мельниченко В.В. Аналіз коливань вантажу на гнучкому підвісі при повороті стріли вантажопідйомного крана. *Підйомно – транспортна техніка*. 2013. №4(40). С. 4 – 16.
3. Григоров О.В., Петренко О.В. Вантажопідйомні машини: навч. посібник. Х. НТУ „ХПІ”. 2006. 304 с.
4. Stanišić, M.M. On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses. *Ingenieur-Archiv*. 1985. vol. 55(3). P. 176-185. DOI:10.1007/bf00536412.
5. Tanizumi, K., Hino, J., Yoshimura, T., & Sakai, T. Modelling of Dynamic Behavior and Control of Truck Cranes. (Modelling of Dynamic Behavior of Truck Cranes with Hydraulic System in Swing Operation). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*. 1994. vol. 60(572). P. 1262–1269. DOI: 10.1299/kikaic.60.1262.
6. Lee, H.P. Dynamic response of a beam with a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*. 1996. vol. 191(2). P. 289-294. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0122.
7. Oguamanam, D.C.D., Hansen, J.S., & Heppler, G.R. Dynamics of a three-dimensional overhead crane system. *Journal of Sound and Vibration*. 2001. vol. 242(3). P. 411-426. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3375.
8. Sun, G., & Kleeberger, M. Dynamic responses of hydraulic mobile crane with consideration of the drive system. *Mechanism and Machine Theory*. 2003. vol. 38(12). P. 1489-1508. DOI: 10.1016/s0094-114x(03)00099-5.
9. Campara, T., Bukvic, H., Sprečic, D. Ability to Control Swinging of Payload during the Movement of the Rotary Cranes Mechanism. *4th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems*. Kaunas Univ Technol Panevezys Inst. Kaunas. LITHUANIA. 2009. P. 52-55.
10. Аварійна ситуація <https://ua.korrespondent.net/world/3625450-u-tsentri-nui-yorka-vpav-kran-ye-zhertvy#13>. (дата звернення 19.03.2019).
11. Аварійна ситуація <https://ua.korrespondent.net/world/russia/3917077-u-moskvi-vpav-20-metrovyi-bashtovyi-kran>. (дата звернення 19.03.2019).
12. Аварійна ситуація <https://ua.korrespondent.net/tag/5912/>. (дата звернення 19.03.2019).
13. Аварійна ситуація <https://ua.korrespondent.net/ukraine/3934788-na-trykarpatti-kran-vpav-na-vantazhivku-ye-zhertvy>. (дата звернення 19.03.2019).
14. Sakawa, Y., Shindo, Y., & Hashimoto, Y. Optimal control of a rotary crane. *Journal of Optimization Theory*

and Applications. 1981. vol. 35(4). P. 535-557. DOI: 10.1007/bf00934931.

15. Qian, Y., & Fang, Y. Switching Logic-Based Nonlinear Feedback Control of Offshore Ship-Mounted Tower Cranes: A Disturbance Observer-Based Approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2018. P. 1-12. DOI: 10.1109/tase.2018.2872621.

16. Golafshani, A.R., & Aplevich, J.D. Computation of time-optimal trajectories for tower cranes. *Proceedings of International Conference on Control Applications*. 1995. P. 1134-1139. DOI: 10.1109/cca.1995.555920.

17. Abdel-Rahman, E.M., & Nayfeh, A.H. Pendulation Reduction in Boom Cranes Using Cable Length Manipulation. *Nonlinear Dynamics*. 2002. vol. 27(3). P. 255-269. DOI: 10.1023/a:1014437225984.

18. Sakawa, Y., & Nakazumi, A. Modeling and Control of a Rotary Crane. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1985. vol. 107(3). P. 200. DOI: 10.1115/1.3140721.

19. Parker, G.G., Bird, J.D. Active damping and target tracking of a shipboard knuckle boom crane. *9th IASTED International Conference on Control and Applications*. Montrea. CANADA. 2007. P. 243-253.

20. Balachandran, B., Li, Y.-Y., & Fang, C.-C. A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillations. *Journal of Sound and Vibration*. 1999. vol. 228(3). P. 651-682. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2440.

21. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин. Монографія. Київ. ЦП «КОМПІНТ». 2012. – 299 с.

22. Loveikin V.S., Mel'nichenko V.A. Optimizatsiya dinamicheskogo rezhima povorota strelovogo kрана. *Motrol*. 2013. Vol 15. №3. P. 70 – 75.

23. Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Кадикало І.О. Оптимізація режимів руху механізмів обертання вантажопідйомних кранів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. Київ. 2017. Вип. 262. С. 177–190.

24. Ловейкін В.С., Ловейкін Ю.В., Кадикало І.О. Оптимізація режиму руху механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводі. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. Київ. 2017. Вип. 275. С. 10–22.

25. Зубко Н.Ф. Прогнозирование коэффициентов динамичности в элементах крановых механизмов. *Вестник Одесского национального морского университета. Одесса*. ОНМУ. 2013. №2(38). С. 63 – 71.

26. Loveikin, V.S., Chovniuk, Yu.V., Liashko, A.P. The crane's vibrating systems controlled by mechatronic devices with magnetorheological fluid: the nonlinear mathematical model of behavior and optimization of work regimes. *Scientific bulletin of National Mining University Scientific and technical journal*. Dnipro. 2014. Vol. 6. P. 97-102.

27. Loveikin, V.S., Romasevych, Yu.O. Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode.

*Scientific bulletin of National Mining University Scientific and technical journal*. Dnipro. 2017. Vol. 4. P. 55-61.

28. Sa, Y.H., Yi, K.Y., Kim, J.O. An attitude control and stabilization of an unstructured object using balancing beam, new construction machinery. *IEEE International Symposium On Industrial Electronics Proceedings*. Pusan. South Korea. 2001. Vols. I-III. P. 792-797.

29. Дьяконов В. П. *Mathematica 4.1/4.2/5.0 в математических и научно-технических расчетах*. М. СОЛОН – Пресс. 2004. 696 с.

## References

1. Loveikin, V.S., Pylypaka, S.F., Kadykalo, I.O. (2017). Dynamic analysis of the mechanism of rotation of the jib crane. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kiev. Vol. 258. 192-202.

2. Loveikin, V.S., Chovnyuk, Yu.V., Mel'nichenko, V.V. (2013). Analysis of the fluctuations of cargo on a flexible suspension when turning the boom of a load-lifting crane. *Hoisting and transport equipment*. 4(40). 4-16.

3. Grigorov, O.V., Petrenko, N.O. (2006). Hoisting machines: navch. posibnik. NTU „HPI”. 304.

4. Stanišić, M.M. (1985). On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses. *Ingenieur-Archiv*. 55(3). 176-185. DOI: 10.1007/bf00536412.

5. Tanizumi, K., Hino, J., Yoshimura, T., & Sakai, T. (1994). Modelling of Dynamic Behavior and Control of Truck Cranes. (Modelling of Dynamic Behavior of Truck Cranes with Hydraulic System in Swing Operation). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*. 60(572). 1262–1269. DOI: 10.1299/kikaic.60.1262.

6. Lee, H.P. (1996). Dynamic response of a beam with a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*. 191(2). 289-294. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0122.

7. Oguamanam, D.C.D., Hansen, J.S., & Heppler, G.R. (2001). Dynamics of a three-dimensional overhead crane system. *Journal of Sound and Vibration*. 242(3). 411-426. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3375.

8. Sun, G., & Kleeberger, M. (2003). Dynamic responses of hydraulic mobile crane with consideration of the drive system. *Mechanism and Machine Theory*. 38(12). 1489-1508. DOI: 10.1016/s0094-114x(03)00099-5.

9. Campara, T., Bukvic, H., Sprečic, D. (2009). Ability to Control Swinging of Payload during the Movement of the Rotary Cranes Mechanism. 4th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems. Kaunas Univ Technol Panevezys Inst. Kaunas. LITHUANIA. 52-55.

10. Emergency situation <https://ua.korrespondent.net/tag/5912/>. (date of the review 19.03.2019).

11. Emergency situation <https://ua.korrespondent.net/world/3625450-u-tsentri-nui-yorka-vpav-kran-ye-zhertvy#13>. (date of the review 19.03.2019).



12. Emergency situation  
<https://ua.korrespondent.net/world/russia/3917077-u-moskvi-vpav-20-metrovyi-bashtovyi-kran>. (date of the review 19.03.2019).
13. Emergency situation  
<https://ua.korrespondent.net/ukraine/3934788-na-prykarpatti-kran-vpav-na-vantazhivku-ye-zhertvy>. (date of the review 19.03.2019).
14. *Sakawa, Y., Shindo, Y., & Hashimoto, Y.* (1981). Optimal control of a rotary crane. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 35(4). 535-557. DOI: 10.1007/bf00934931.
15. *Qian, Y., & Fang, Y.* (2018). Switching Logic-Based Nonlinear Feedback Control of Offshore Ship-Mounted Tower Cranes: A Disturbance Observer-Based Approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 1-12. DOI: 10.1109/tase.2018.2872621.
16. *Golafshani, A.R., & Aplevich, J.D.* (1995). Computation of time-optimal trajectories for tower cranes. *Proceedings of International Conference on Control Applications*. 1134-1139. DOI: 10.1109/cca.1995.555920.
17. *Abdel-Rahman, E.M., & Nayfeh, A.H.* (2002). Pendulation Reduction in Boom Cranes Using Cable Length Manipulation. *Nonlinear Dynamics*. 27(3). 255-269. DOI: 10.1023/a:1014437225984.
18. *Sakawa, Y., & Nakazumi, A.* (1985). Modeling and Control of a Rotary Crane. *Journal of Dynamic Systems. Measurement. and Control*. 107(3). 200. DOI: 10.1115/1.3140721.
19. *Parker, G.G., Bird, J.D.* (2007). Active damping and target tracking of a shipboard knuckle boom crane. 9th IASTED International Conference on Control and Applications. Montrea. CANADA. 243-253.
20. *Balachandran, B., Li, Y.-Y., & Fang, C.-C.* (1999). A mechanical filter concept for control of nonlinear crane-load oscillations. *Journal of Sound and Vibration*. 228(3). 651-682. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2440.
21. *Loveikin, V.S., Romasevych, Yu.O.* (2012). Analysis and synthesis of modes of movement of mechanisms of load-lifting machines. *Kiev. СР «KOMPRINT»*. 299.
22. *Loveikin, V.S., Mel'nichenko, V.A.* (2013). Optimization of the dynamic rotation mode of the boom. *Motrol*. Vol. 15 (3). 70-75.
23. *Loveikin, V.S., Chovnyuk, Yu.V., Kadykalo, I.O.* (2017). Optimization of modes of movement of rotating mechanism of cranes. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kiev. Vol. 262. 177-190.
24. *Loveikin, V.S., Loveikin, Yu.V., Kadykalo, I.O.* (2017). Optimization of mode of movement of rotation mechanism of illicit small tap on criterion of RMS value of rate of change of elastic torque in drive. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*. Kiev. Vol. 275. 10-22.
25. *Zubko, N.F.* (2013). Prediction of dynamic coefficients in elements of crane mechanisms. *Bulletin of the Odessa National Maritime University*. 2(38). 63 – 71.
26. *Loveikin, V.S., Chovniuk, Yu.V., Liashko, A.P.* (2014). The crane's vibrating systems controlled by

mechatronic devices with magnetorheological fluid: the nonlinear mathematical model of behavior and optimization of work regimes. *Scientific bulletin of National Mining University Scientific and technical journal*. Dnipro. Vol. 6. 97-102.

27. *Loveikin, V.S., Romasevych, Yu.O.* (2017). Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode. *Scientific bulletin of National Mining University Scientific and technical journal*. Dnipro. Vol. 4. 55-61.

28. *Sa, Y.H., Yi, K.Y., Kim, J.O.* (2001). An attitude control and stabilization of an unstructured object using balancing beam, new construction machinery. *IEEE International Symposium On Industrial Electronics Proceedings*. Pusan. South Korea. Vols. I-III. 792-797.

29. *D'yakonov, V.P.* (2004). *Mathematica 4.1 / 4.2 / 5.0 in mathematical and scientific-technical calculations*. SOLON – Press. 696.

#### ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПОВОРОТА СТРЕЛОВОГО КРАНА ПО КРИТЕРІЮ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЯ В ПРИВОДНОМ МЕХАНИЗМЕ

*В. С. Ловеikin, Ю. А. Ромасевич, А. В. Ловеikin,  
И. А. Кадыкало*

**Аннотация.** На основе предыдущего динамического анализа выявлено, что во время работы механизма поворота башенного крана возникают колебания груза и значительные динамические нагрузки в элементах конструкции и привода. Эти явления возникают во время переходных режимов движения (пуска и торможения). Для их минимизации проведена оптимизация процесса пуска по определенному оптимизационному критерию. В данной статье решена задача оптимизации режима поворота стрелового крана по критерию среднеекватрического значения ускорения изменения усилия в приводном механизме. Решение вариационной задачи полученный в виде функциональных зависимостей режима движения отдельных звеньев механизма поворота башенного крана, который представлен в графическом виде.

Полученные законы движения по критерию среднеекватрического значения ускорения изменения усилия в приводном механизме (режим 2) имеют значительные преимущества по сравнению с законами движения по критерию среднеекватрического значения скорости изменения упругого момента в приводном механизме (режим 1). В результате проведенного анализа было выявлено, что при режиме 2 максимальные и среднеекватрические значения большинства кинематических и силовых характеристик принимают меньшие значения по сравнению с режимом 1, по некоторым показателям эти параметры равнозначны. Однако характер изменения этих показателей при режиме 2 имеет плавный вид. Полученный оптимальный режим движения механизма поворота крана позволяет устранить колебания груза на гибком подвесе при работе механизма поворота, а также

уменьшить динамические нагрузки в приводе и металлоконструкции крана.

Следует отметить, что использование оптимальных законов движения позволяет значительно повысить надежность и производительность работы крана и уменьшить аварийные ситуации при выполнении разгрузочно-погрузочных операций. Реализация полученных оптимальных режимов движения осуществляется с помощью мехатронных устройств системы управления приводным механизмом.

**Ключевые слова:** башенный / стреловой кран, механизм поворота, груз, вращение, динамические нагрузки, оптимизация, минимизация, критерий, усилия, колебания, упругий момент, изменение скорости, ускорения, оптимальное управление.

#### OPTIMIZING THE MODE OF SWING OPERATION OF JIB CRANE IS SOLVED BY CRITERION OF RMS VALUE OF ACCELERATION OF CHANGE IN FORCE IN DRIVE MECHANISM

*V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych, A. V. Loveikin, I. O. Kadykalo*

**Abstract.** Based on the previous dynamic analysis, it was discovered that during the operation of the rotation mechanism of the tower crane, there are fluctuations of the load and significant dynamic loads in the elements of the structure and drive. These phenomena arise during the transitive modes of motion (starting and braking). For their minimization, the optimization of the start-up process was performed according to a certain optimization criterion. In this article, the problem of optimizing the mode of rotation of the jib crane is solved by the criterion of the RMS (root mean-square) value of acceleration of the change in force in the drive mechanism. The solution of the variational problem is obtained in the form of functional dependencies of the motion mode of individual parts of the rotation mechanism of a tower crane and is presented in graphical form.

The obtained laws of motion according to the criterion of the RMS value of acceleration of the change in force in the drive mechanism (mode 2) have significant advantages compared to the laws of motion based on the criterion of the RMS value of the rate of change of the elastic moment in the drive mechanism (mode 1). As a result of the analysis, it was found that under mode 2, the maximum and RMS values of most kinematic and power characteristics have less values than under mode 1, for some indicators these parameters are equivalent. However, the nature of the change of these indicators under mode 2 is smooth. The obtained optimal mode of motion of the rotation mechanism of a crane allows to eliminate the fluctuations of the load on the flexible suspension during the rotation mechanism operation, as well as to reduce the dynamic loads in the drive and metal framework of a crane.

It should be noted that the use of optimal laws of motion makes it possible to significantly increase the reliability and performance of the crane operation and reduce emergencies during loading and unloading procedures. The realization of the optimal modes of

motion is achieved with the help of the mechatronic devices of the control system of the drive mechanism.

**Key words:** tower / jib crane, rotation mechanism, load, rotation, dynamic load, optimization, minimization, criterion, force, oscillation, elastic moment, speed change, acceleration, optimal control.

**В. С. Ловеїкін** ORCID 0000-0003-4259-3900.

**Ю. О. Ромасевич** ORCID 0000-0001-5069-5929.

**А. С. Ловеїкін** ORCID 0000-0003-4259-3900.

**І. О. Кадикало** ORCID 0000-0001-8217-866X.

