

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО КРАНА МОСТОВОГО ТИПУ

Ловейкін В.С., д.т.н., Ромасевич Ю.О., к.т.н.

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*В статті приведено розв'язок задачі оптимального керування рухом вантажопідйомного крана мостового типу. Виконано аналіз результатів моделювання руху крана за енергетичними, електричними, динамічними та кінематичними показниками. Доведена ефективність використання запропонованого оптимального закону руху крана.*

### **Постановка проблеми.**

Вантажопідйомні крани мостового типу використовуються у сільськогосподарському виробництві, металургії, машинобудуванні та інших галузях народного господарства. При виконанні перевантажувальних процесів у елементах цих кранів виникають значні динамічні навантаження, які знижують надійність роботи крана. Значна частка енергетичних витрат йде на шкідливий нагрів приводних двигунів, що знижує їх довговічність.

Однією з проблем, яка виникає під час транспортування вантажу на гнучкому підвісі, є розгойдування вантажу. Досвідчені кранівники успішно їх усувають шляхом короткочасних вмикань приводу. Однак, такий спосіб не можна вважати ефективним, оскільки він знижує енергетичну ефективність роботи крана та збільшує динамічні навантаження у його елементах.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Дослідженню динаміки руху мостових кранів присвячені роботи [1-5], які проведені для випадків використання двигунів постійного струму або змінного струму із фазним ротором.

Останнім часом мостові крани обладнують частотно-керованим приводом, який призводить до зміни характеру збурення у динамічній системі крана. Дослідженню роботи кранів, які обладнані частотними перетворювачами, присвячені роботи [6, 7]. Використання стандартних налаштувань у частотних перетворювачах не дають змоги у повній мірі усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі та зменшити динамічні навантаження у елементах крана. Однак, зменшення енерговитрат при частотному керуванні є значним, навіть при стандартних налаштуваннях частотних перетворювачів. Зменшення небажаних показників руху мостового крана з вантажем на гнучкому підвісі можливе з використанням оптимального керування. Розробці та дослідженню оптимальних законів керування рухом кранів присвячені роботи [6-10].

### **Постановка мети та задач дослідження.**

Метою приведеної роботи є дослідження оптимального закону руху мостового крана, що обладнаний частотно-керованим асинхронним приводом.

У відповідності до мети ставляться такі задачі: 1) синтезувати оптимальне

керування мостовим краном на гнучкому підвісі; 2) провести моделювання руху крана; 3) проаналізувати отримані результати та оцінити ефективність практичного використання знайденого оптимального керування рухом вантажопідйомного крана.

### Виклад основного матеріалу.

Для проведення дослідження використаємо динамічну модель руху мостового крана, яка показана на рис. 1.

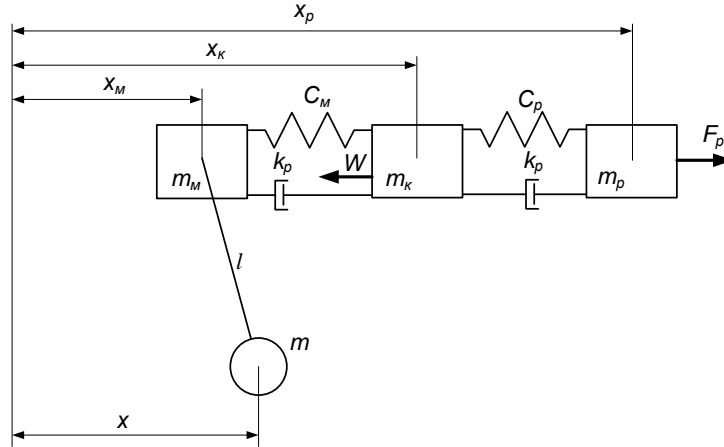


Рис. 1 – Чотиримасова динамічна модель руху мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі

Динаміка руху крана із врахуванням збурюючої дії від асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\ 3pL_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \frac{u \eta_{nep}}{r_{кол}} = m_p \ddot{x}_p + c_p (x_p - x_k) + k_p (\dot{x}_p - \dot{x}_k); \\ m_k \ddot{x}_k = c_p (x_p - x_k) + k_p (\dot{x}_p - \dot{x}_k) - c_m (x_k - x_m) - k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - W \text{sign}(\dot{x}_k); \\ m_m \ddot{x}_m = c_m (x_k - x_m) + k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - \frac{mg}{l} (x_m - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l} (x_m - x), \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $u$  – передаточне число механізму переміщення крана;  
 $r_{кол}$  – радіус приводного колеса крана;

$\eta_{пер}$  – ККД передач приводу крана;

$W$  – опір переміщенню мостового крана, прикладений до коліс кінцевих балок;

$l$  – довжина гнучкого підвісу вантажу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі координатні осі  $\alpha$  і  $\beta$ ;

$i_{2\alpha}, i_{2\beta}$  – проекції узагальненого вектора струму ротора на нерухомі координатні осі  $\alpha$  і  $\beta$ ;

$L_1, L_2$  – індуктивності статорної та роторної обмоток;  $L_{12}$  – взаємодукація;  $k_r$  і  $k_s$  – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ( $k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$ ;  $k_s = \frac{L_{12}}{L_1}$ );

$M$  – електромагнітний момент двигуна;

$p$  – кількість пар полюсів електричної машини;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}$  – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі  $\alpha$  і  $\beta$  ( $u_{1\alpha} = U_{\max} \cos(2\pi \int f dt)$ ,  $u_{1\beta} = U_{\max} \sin(2\pi \int f dt)$ );

$U_{\max}$  – амплітуда фазної напруги живлення двигуна;  $f$  – частота напруги живлення двигуна;  $e_{2\beta}, e_{2\alpha}$  – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях  $\alpha$  і  $\beta$  відповідно ( $e_{2\alpha} = p\omega_{\delta}(L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2$ ,

$e_{2\beta} = p\omega_{\delta}(L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) - i_{2\beta} R_2$ );

$R_1$  – активний опір статорної обмотки;

$R_2$  – приведений до статора активний опір роторної обмотки;

$\delta$  – коефіцієнт розсіювання ( $\delta = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{2\pi f L_{12}}\right)\left(1 + \frac{X_2}{2\pi f L_{12}}\right)}$ );

$X_1$  – індуктивний опір статорної обмотки;

$X_2$  – приведений до статора індуктивний опір роторної обмотки;

$m_p, m_k, m_m, m$  – приведені до поступального руху маси приводного механізму, кінцевих балок, моста і вантажу відповідно;

$x_p, x_k, x_m, x$  – узагальнені координати, які відповідають масам  $m_p, m_k, m_m$  и  $m$ ;

$c_p, c_k, c_m$  – приведені жорсткості привода, кінцевих балок і моста крана відповідно;

$k_p, k_m$  – приведені коефіцієнти дисипації в приводі і крановому мості відповідно.

Крапка над символом означає диференціювання за часом.

Для усунення коливань елементів крана, представленого моделлю (1), необхідно, щоб підінтегральний вираз оптимізаційного критерію включав як мінімум сьому похідну функції  $x(t)$  за часом. Крім того, необхідно щоб підінтегральний вираз було представлено у квадратичній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(0) = \dot{x}(0) = \ddot{x}(0) = \overset{IV}{\ddot{x}}(0) = \overset{V}{x}(0) = \overset{VII}{x}(0) = 0; \\ x(t_{розг}) = s; \\ \dot{x}(t_{розг}) = v; \\ \overset{IV}{\ddot{x}}(t_{розг}) = \overset{V}{\ddot{x}}(t_{розг}) = \overset{VII}{x}(t_{розг}) = \overset{V}{\dot{x}}(t_{розг}) = \overset{VII}{x}(t_{розг}) = 0; \\ \overset{VI}{x}(t_{розг}) = -W c_m g / m_m m_k l, \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $t_{розг}$  – тривалість розгону мостового крана;  
 $A_1, A_2, A_3, A_4$  – постійні коефіцієнти, які визначаються з наступних виразів:

$$\begin{aligned} A_1 &= m_m + m + m_k + m_p; \\ A_2 &= \frac{(m_m + m)(m_p + m_k)}{c_m} + \frac{m_p(m_m + m + m_k)}{c_p} + (m_m + m_k + m_p) \frac{l}{g}; \\ A_3 &= \frac{(m_m + m)m_p m_k}{c_p c_m} + \left( \frac{m_p(m_m + m_k)}{c_p} + \frac{m_m(m_p + m_k)}{c_m} \right) \frac{l}{g}; \\ A_4 &= \frac{m_i m_p m_e l}{c_p c_i g}. \end{aligned}$$

Умовою мінімуму критерію (2) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$\overset{XVI}{x} + B_1 \overset{XIV}{x} + B_2 \overset{XII}{x} + B_3 \overset{X}{x} + B_4 \overset{VIII}{x} + B_5 \overset{VI}{x} + B_6 \overset{IV}{x} = 0, \quad (3)$$

де  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$  – постійні коефіцієнти.

Знайти розв'язок диференціального рівняння (3) в аналітичному виді неможливо. Таким чином, оптимізаційна завдання (1), (2) не може бути розв'язана в аналітичному вигляді методом варіаційного числення. Для її розв'язку виконаємо заміну підінтегрального виразу критерію (2). Надалі це дасть можливість знайти наближений розв'язок задачі (1), (2).

Для знаходження „опорної” функції, за допомогою якої надалі буде виконана мінімізація критерію (2), використовуємо критерій:

$$I_{\left( \overset{IV}{x_m - x} \right)^2} = \left[ \frac{1}{t_{розг}} \int_0^{t_{розг}} \left( \overset{IV}{x_m - x} \right)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{g^2}{l^2} \frac{1}{t_{розг}} \int_0^{t_{розг}} \left( \overset{VIII}{x} \right)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Умова мінімуму критерію (5) – рівняння Ейлера-Пуассона:

$$\overset{XVI}{x} = 0. \quad (5)$$

Розв'язок диференціального рівняння (5) представляється у вигляді полінома:

$$x = \sum_{i=0}^{i=15} Q_i t^i, \quad (6)$$

де  $Q_i$  – постійні інтегрування, які визначаються із крайових умов руху мостового крана:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(0) = \dot{x}(0) = \ddot{x}(0) = \overset{IV}{\ddot{x}}(0) = \overset{V}{x}(0) = \overset{VII}{x}(0) = 0; \\ x(t_{p03z}) = s; \\ \dot{x}(t_{p03z}) = v; \\ \overset{IV}{\ddot{x}}(t_{p03z}) = \overset{V}{\ddot{x}}(t_{p03z}) = \overset{VII}{x}(t_{p03z}) = \overset{V}{x}(t_{p03z}) = \overset{VII}{x}(t_{p03z}) = 0; \\ \overset{VI}{x}(t_{p03z}) = -W c_m g / m_m m_k l, \end{array} \right. \quad (7)$$

де  $s$  – відстань переміщення крана протягом перехідного процесу;  
 $v$  – усталена швидкість руху крана;  
 $t_{p03z}$  – тривалість розгону крана.

З урахуванням крайових умов (7) вираз (6) записується так:

$$x = \frac{t^6}{t_{p03z}^{15}} \left( \frac{-W c_m g}{m_m m_k l} (t - t_{p03z})^8 t_{p03z}^6 (8t + t_{p03z}) - 720st^2 (3432t^7 - 25740t^6 t_{p03z} + 83160 \times \right. \\ \times t^5 t_{p03z}^2 - 150150t^4 t_{p03z}^3 + 163800t^3 t_{p03z}^4 - 108108t^2 t_{p03z}^5 + 40040t t_{p03z}^6 - 6435t^7 t_{p03z}^7) + 720 \times (8) \\ \times t^2 (t - t_{p03z}) t_{p03z} (1716t^6 - 11088t^5 t_{p03z} + 30030t^4 t_{p03z}^2 - 43680t^3 t_{p03z}^3 + 36036t^2 t_{p03z}^4 - \\ \left. - 16016t t_{p03z}^5 + 3003t_{p03z}^6) v \right).$$

У виразі (8) присутній параметр  $s$ , який апріорі не заданий. Це дозволяє використовувати його для того, щоб на „опорній” функції (6) досягти мінімум критерію (1). Для цього необхідно розв'язати рівняння:

$$\frac{\partial I_{F_p^2}}{\partial s} = 0. \quad (9)$$

Свідомо не будемо приводити рівняння (9) у розгорнутому виді, оскільки воно має значний об'єм. Розв'язок рівняння (9) має такий вигляд:

$$s = \frac{vt_{p03z}}{2}. \quad (10)$$

Підставляючи вираз (10) в (8) одержимо функцію, яка мінімізує одночасно два критерії (2) і (4).

Проведемо моделювання руху мостового крана за оптимальним законом руху (8), (10). Будемо вважати, що використовується частотне керування

асинхронним приводом крана, а сам закон реалізується у вигляді дискретного задання частоти напруги живлення двигунів.

Дискретна форма оптимального закону керування представляється у вигляді двомірного масиву. Для унаочнення такої форми закону руху крана представимо його у вигляді таблиці 1. У табл. 1 використані такі позначення:  $t_i$  –  $i$ -те значення дискретного часу;  $f_i$  –  $i$ -те значення дискретної частоти;  $N$  – кількість дискретних значень частоти або часу (розмірність масиву), яка визначається за таким виразом:

$$N = \frac{T}{\Delta t}, \quad (11)$$

де  $\Delta t$  – тривалість між сусідніми дискретними значеннями часу (крок часу);  
 $T$  – тривалість моделювання руху мостового крана. Показник  $i$  пробігає значення від 0 до  $N$ .

Таблиця 1 – Дискретна форма оптимального закону керування

Дискретний час	$t_0$	$t_1$	$t_2$	...	$t_{i-1}$	$t_i$	$t_{i+1}$	...	$t_{N-1}$	$t_N$
Дискретна частота	$f_0$	$f_1$	$f_2$	...	$f_{i-1}$	$f_i$	$f_{i+1}$	...	$f_{N-1}$	$f_N$

При реалізації уточненого закону зміни частоти напруги живлення між сусідніми значеннями частоти  $f_{i-1}$  та  $f_i$  її зміна відбувається за лінійним законом, що визначається відповідним налаштуванням у частотних перетворювачах.

Подальше дослідження уточненого оптимального закону руху проведено за допомогою розрахункових експериментів. Це дасть змогу відповісти на питання про можливість практичної реалізації уточненого оптимального закону.

Оцінка ефективності використання оптимального керування рухом мостового крана проведена за енергетичними, електричними, динамічними та кінематичними показниками. Розрахункові експерименти проведено при умові, що довжина гнучкого підвісу змінюється з часом: зменшується при розгоні крана та збільшується при його гальмуванні. Незалежними факторами у дослідженнях є: початкова довжина гнучкого підвісу, початкова напруга живлення кранових приводних двигунів, тривалість розгону та гальмування двигуна (реальна тривалість розгону/ гальмування приводних двигунів може відрізнитись від заданої у налаштуваннях частотного перетворювача). Кожен незалежний фактор варіюється на трьох рівнях.

У табл. 2 представлені оціночні показники, які отримані за допомогою проведення розрахункових експериментів. Три значення в кожній комірці таблиці відповідають трьом значенням початкової напруги живлення  $0$ ,  $0,1U_{ном}$  та  $0,3U_{ном}$ . Для випадків початкової довжини гнучкого підвісу  $7,25$  м та  $14,25$  м при  $t_{розг}=3$ с значення частоти напруги живлення на деяких етапах руху крана набуває від'ємних значень, що означає зміну чергування фаз двигуна. Такі режими роботи частотних перетворювачів необхідно

уникати, тому розрахункові експерименти для вказаних випадків не проводились (у табл. 2 відповідні комірки заповнені прочерками).

Проведемо аналіз даних, які представлені у табл. 2. Тривалість розгону та гальмування значно впливає на енергетичні показники руху крана. Крім того, при тривалості розгону та гальмування 3 секунди збільшення початкової напруги живлення двигунів призводить до зниження енергетичних витрат. Загалом для всіх розрахункових експериментів витрати енергії менші аніж для стандартних характеристик розгону та гальмування, які налаштовуються у частотних перетворювачах [11] (лінійної, S-подібної та подвійної S-подібної). Для більших тривалостей  $t_{розг}$  витрати енергії зменшуються: на 19% для  $t_{розг}=6$  секунд і на 23% для  $t_{розг}=9$  секунд. Таким чином, використання уточненого оптимального закону (8), (10) дозволяє зменшити енергетичні витрати крана.

Таблиця 2 – Оціночні показники руху мостового крана за оптимальним законом

1	початкова довжина гнучкого підвісу вантажу		
	2,25 м	7,25 м	14,25 м
1	2	3	4
Тривалість розгону та гальмування 3 секунди			
Витрати енергії $E$ , Дж	409936	-	-
	333972	-	-
	222582	-	-
Втрати енергії $\Delta E$ , Дж	246925	-	-
	163276	-	-
	46610	-	-
Відносні втрати енергії $\tilde{E}$ , %	60,23	-	-
	48,88	-	-
	20,94	-	-
Максимальний електромагнітний момент двигуна $M_{\max}$ , Нм	184	-	-
	182	-	-
	208	-	-
Кратність максимального моменту двигуна, $\tilde{M}_{\max}$	3,29	-	-
	3,26	-	-
	3,72	-	-
Максимальний струм двигуна $I_{\max}$ , А	237	-	-
	216	-	-
	146	-	-
Кратність максимального струму двигуна, $\tilde{I}_{\max}$	5,85	-	-
	5,34	-	-
	3,61	-	-
Максимальний момент у швидкохідному валу привода $M_{n,\max}$ , Нм	773	-	-
	545	-	-
	321	-	-
Максимальне приведенне зусилля у мості $R_{m,\max}$ , Н	63574	-	-
	68773	-	-
	54166	-	-
Максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta x_{\max}$ , м	0,281	-	-
	0,424	-	-
	0,372	-	-
Максимальний кут відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta \varphi_{\max}$ , рад	0,094	-	-
	0,142	-	-
	0,125	-	-
Лінійна амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta x_{\max}(t > T)$ , м	0,109	-	-
	0,089	-	-
	0,035	-	-
Кутова амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta \varphi_{\max}(t > T)$ , рад	0,036	-	-
	0,029	-	-
	0,011	-	-



Продовж. табл. 2.

1	2	3	4
Тривалість розгону та гальмування 6 секунд			
Витрати енергії $E$ , Дж	176169	174646	184402
	180184	178347	185281
	189965	188355	190117
Втрати енергії $\Delta E$ , Дж	16178	15144	25659
	20188	18841	26517
	29972	28839	31333
Відносні втрати енергії $\tilde{E}$ , %	9,18	8,67	16,48
	11,20	10,56	14,31
	15,77	15,31	13,91
Максимальний електромагнітний момент двигуна $M_{\max}$ , Нм	91	97	117
	95	106	130
	144	152	138
Кратність максимального моменту двигуна, $\tilde{M}_{\max}$	1,63	1,74	2,09
	1,71	1,91	2,32
	2,58	2,73	2,47
Максимальний струм двигуна $I_{\max}$ , А	147	151	155
Кратність максимального струму двигуна, $\tilde{I}_{\max}$	3,64	3,73	3,82
		3,58	
Максимальний момент у швидкохідному валу привода $M_{n,\max}$ , Нм	138	144	171
	145	149	184
	167	160	196
Максимальне приведенне зусилля у мості $R_{M,\max}$ , Н	27460	26763	27728
	29274	28492	32852
	32465	30161	34965
Максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta x_{\max}$ , м	0,189	0,497	0,922
	0,187		
	0,186		
Максимальний кут відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta \varphi_{\max}$ , рад	0,063	0,062	0,061
	0,062		
Лінійна амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta x_{\max}(t > T)$ , м	0,018	0,016	0,030
	0,016		0,023
Кутова амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta \varphi_{\max}(t > T)$ , рад	0,006	0,002	0,002
	0,005		0,001

Продовж. табл. 2.

1	2	3	4
<b>Тривалість розгону та гальмування 9 секунд</b>			
Витрати енергії $E$ , Дж	160269	158383	157299
	167448	164554	162753
	183709	178402	175159
Втрати енергії $\Delta E$ , Дж	13432	11844	11175
	20610	18011	16626
	36872	31862	29027
Відносні втрати енергії $\tilde{E}$ , %	8,38	7,47	7,10
	12,30	10,94	10,21
	20,07	17,85	16,57
Максимальний електромагнітний момент двигуна $M_{\max}$ , Нм	71	59	64
	79	78	75
	81	80	91
Кратність максимального моменту двигуна, $\tilde{M}_{\max}$	1,27	1,06	1,15
	1,42	1,39	1,35
	1,45	1,43	1,63
Максимальний струм двигуна $I_{\max}$ , А	145		
Кратність максимального струму двигуна, $\tilde{I}_{\max}$	3,58		
Максимальний момент у швидкохідному валу привода $M_{n,\max}$ , Нм	109	90	96
	123	119	113
	125	124	140
Максимальне приведенне зусилля у мості $R_{m,\max}$ , Н	19017	16777	19024
	20261	20561	23195
	20533	21781	26911
Максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta x_{\max}$ , м	0,121	0,334	0,620
Максимальний кут відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta \varphi_{\max}$ , рад	0,040	0,041	0,041
Лінійна амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta x_{\max}(t > T)$ , м	0,010	0,003	0,013
Кутова амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta \varphi_{\max}(t > T)$ , рад	0,003	0	

Перейдемо до аналізу електричних показників. В плані зниження максимальних значень електромагнітного моменту та струму двигуна переваги оптимального керування проявляються лише при тривалостях розгону та гальмування 6 та 9 секунд. Приведемо графіки зміни струму (рис. 2) та електромагнітного моменту двигуна (рис. 3), які відповідають найбільшим значенням електричних показників у проведених розрахункових експериментах. Аналіз графіків на рис. 2 та рис. 3 показує, що найбільш

небезпечним режимом роботи двигуна є його пуск. Це приводить до висновку, що на режим пуску двигуна необхідно звертати особливу увагу при дослідженні руху крана.

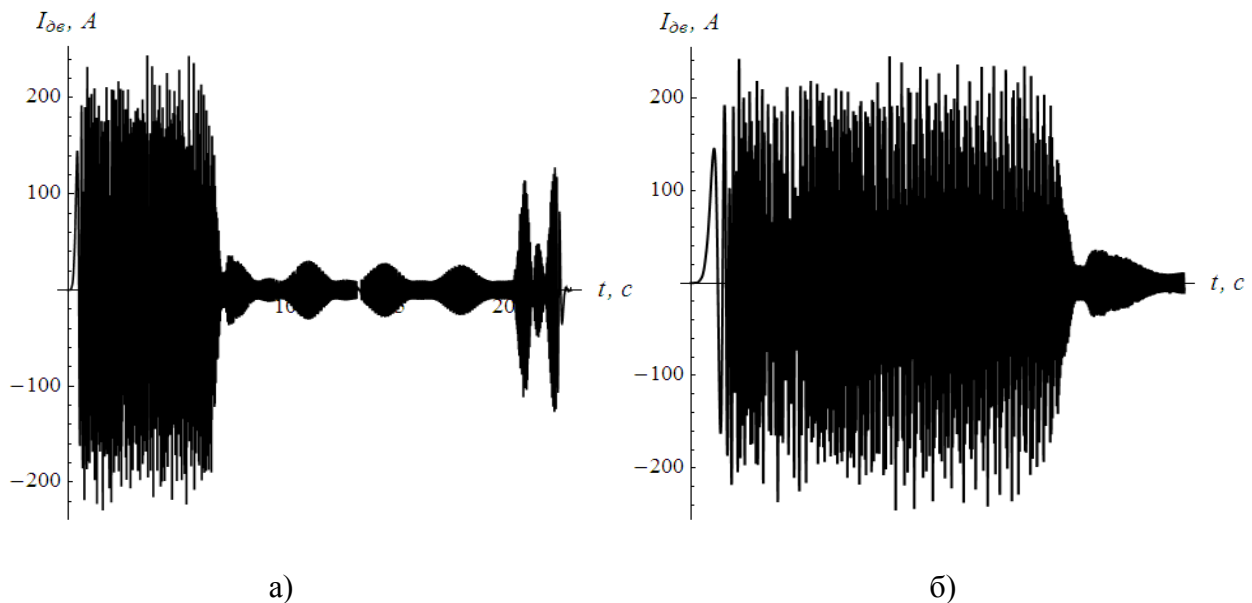


Рис. 2 – Зміна струму споживаного крановим двигуном: а) протягом усього циклу руху; б) протягом пуску

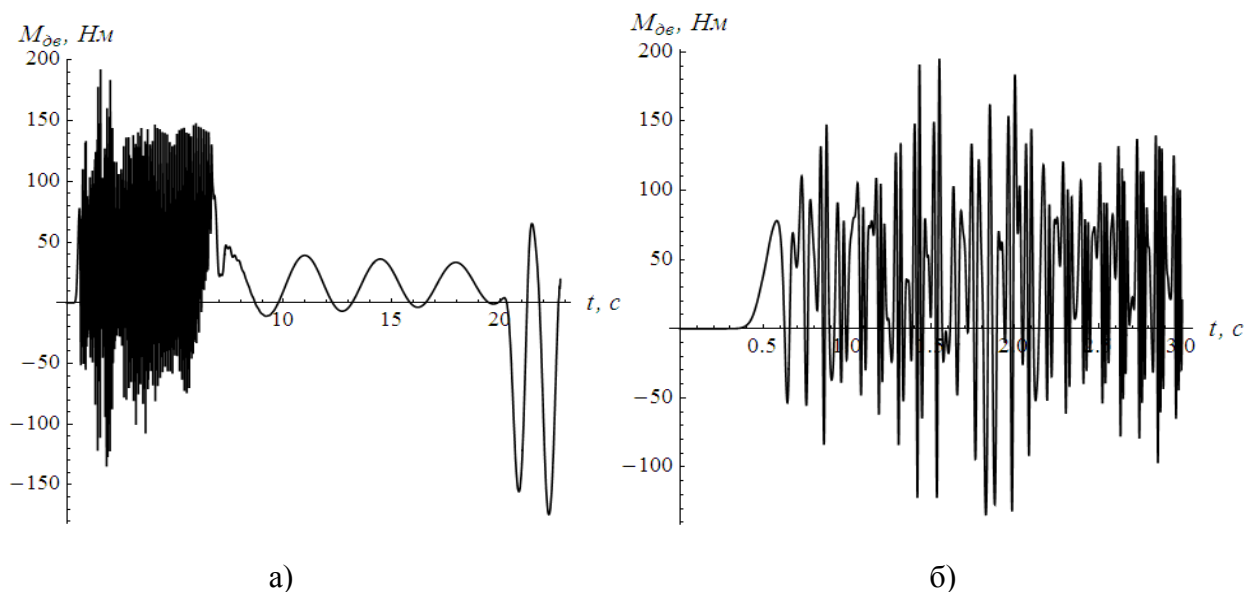


Рис. 3 – Зміна електромагнітного моменту кранового двигуна: а) протягом усього циклу руху; б) протягом пуску

Таким чином, бажано експлуатувати кран при тривалості розгону та гальмування не менше 6 секунд, що дозволяє зменшити небажані динамічні навантаження на елементи крана.

Приведемо графіки динамічних показників для випадку їх найбільших значень (рис. 4 та рис. 5). Аналіз приведених графіків підтверджує вже зроблений висновок про те, що до режиму пуску крана необхідно пред'являти особливу увагу.

Проаналізуємо залишкові коливання вантажу на гнучкому підвісі. Максимальне відхилення канату з вантажем після зупинки крана не перевищує

0,011 радіан (0,60). Проілюструємо еволюцію коливань вантажу на гнучкому підвісі за допомогою фазового портрету (рис. 6), який побудований за даними розрахункового експерименту при  $l_0=7,25$  м,  $U_0=0,1U_{ном}$  та  $t_{розг}=6$  с.

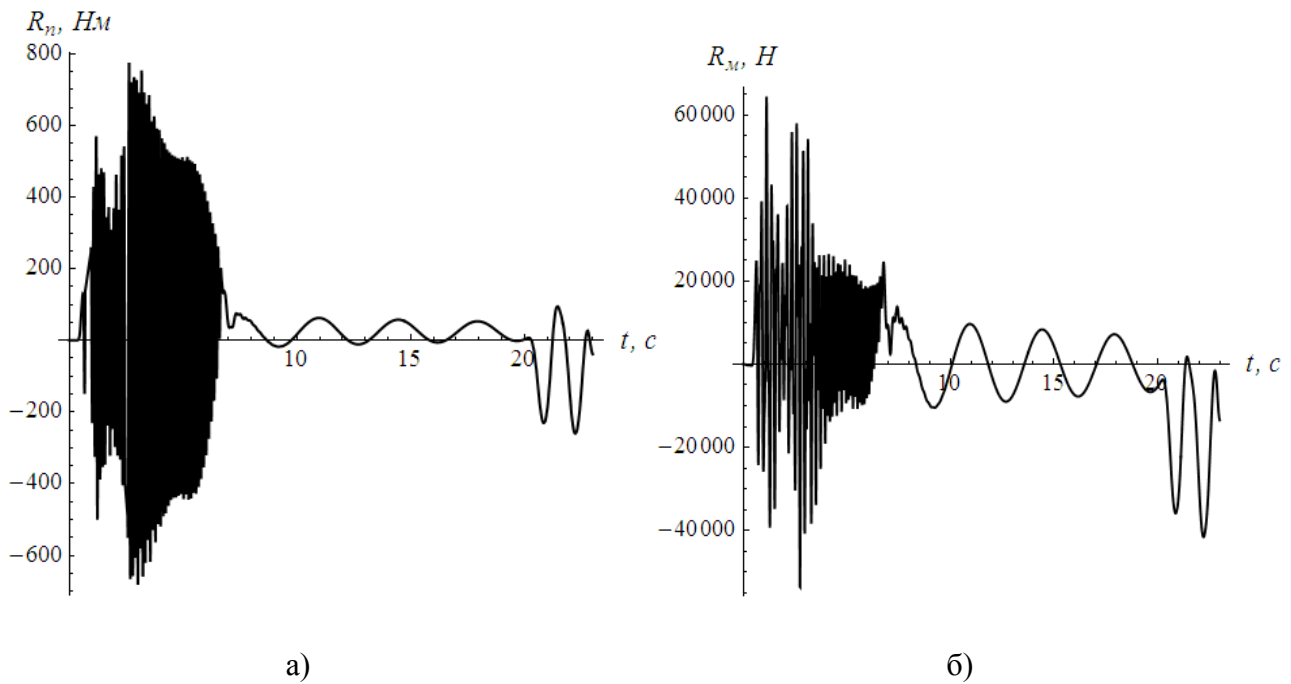


Рис. 5 – Графіки зміни динамічних показників роботи крана: а) момент на швидкохідному валу привода; б) приведене зусилля у крановому мості

Фазовий портрет коливань вантажу на гнучкому підвісі показує, що відхилення вантажу відбувається протягом пуску та гальмування крана, а залишкові коливання вантажу настільки малі, що ними можна знехтувати.

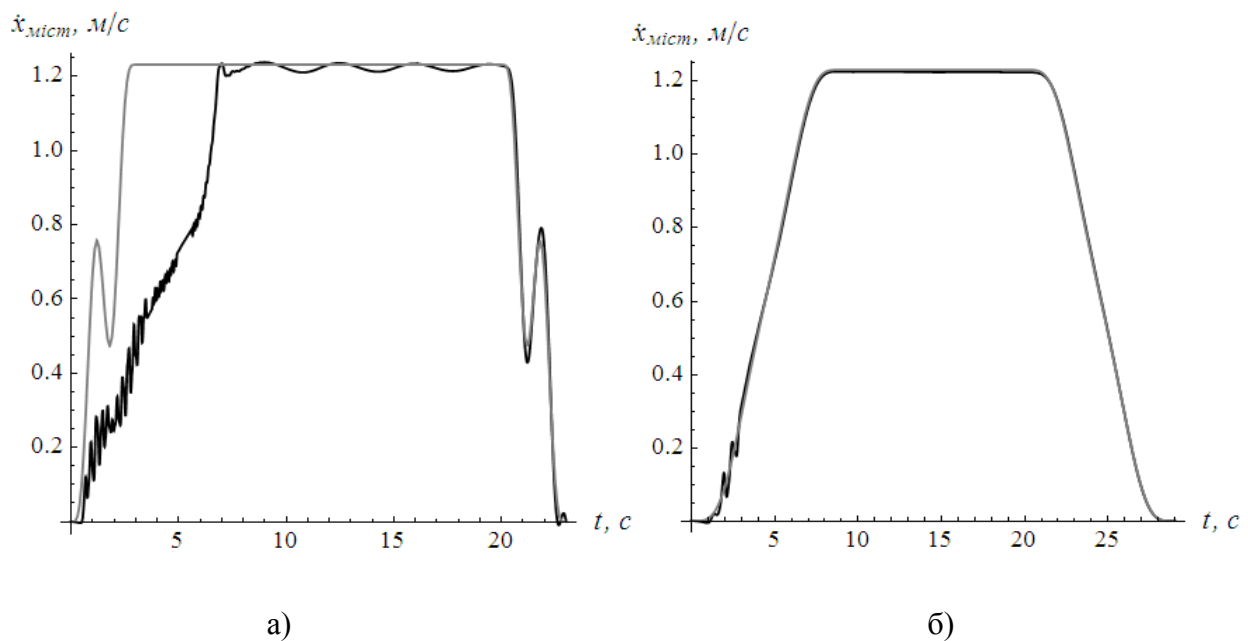


Рис. 7 – Графіки зміни швидкості руху моста при наступних параметрах: а)  $t_{розг}=3$  секунди,  $l_0=2,25$  м,  $U_0=0$ ; б)  $t_{розг}=9$  секунд,  $l_0=6,25$  м,  $U_0=0,3U_{ном}$

Приведемо графіки зміни швидкості руху кранового моста (рис. 7). Тут сірим кольором показано графік заданої швидкості, яка пропорційна частоті напруги живлення двигунів, а чорним кольором – графік швидкості руху моста, який отриманий за даними розрахункових експериментів. Аналіз графіків показує, що для невеликої тривалості перехідних процесів похибка між швидкістю, що отримана у результаті проведення експериментів, та заданою швидкістю руху крана є значною. При збільшенні показників  $t_{розг}$  та  $U_0$  вказана похибка зменшується.

## Висновок

У результаті проведених досліджень встановлено, що використання знайденого оптимального закону руху мостового крана дозволяє підвищити ефективність його експлуатації. При цьому зменшується загальне енергоспоживання кранових двигунів, підвищується точність позиціонування вантажу за рахунок усунення його коливань на гнучкому підвісі, знижується рівень динамічної навантаженості елементів крана та усуваються пікові струмові навантаження. Реалізація оптимального керування покладається на мехатронну систему керування рухом крана.

## Список використаної літератури

1. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 206 с.
2. Казак С.А. Динамика мостовых кранов / С.А. Казак. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
3. Грузоподъемные краны. Кн. 2 / М. Шеффлер, Х. Дресиг, Ф. Курт; [пер. с немецкого М.М. Рунов, В.Н. Федосеев]; под ред. М.П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.
4. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Л.Я. Будиков. – Луганск: Издательство ВУГУ, 1997. – 210 с.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов– М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв. – Одесса.: СМІЛ, 2008. – 192 с.
7. Ловейкін В.С. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідійомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПРІНТ”, 2012. – 298 с.
8. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дисс. на соиск. степ. доктора техн. наук: 05.05.05 / Григоров Отто Владимирович. – Х., 1995. – 386 с.
9. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дисс. на соиск. степ. канд техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. - Одесса, 2000. – 116 с.

10. Базил Ш. Управление электроприводом циклически работающих механизмов горизонтального перемещения: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Базил Шафик. - Одесса, - 1993. – 186 с.
11. Преобразователи частоты FR-E7: руководство по эксплуатации: артикул 212650. Версия В. Mitsubishi Electric Industrial Automation. – 2008. – 512 с.

## **Аннотация**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА МОСТОВОГО ТИПА**

Ловейкин В.С., Ромасевич Ю.О.

*В статье приведено решение задачи оптимального управления движением грузоподъемным краном мостового типа. Проведен анализ результатов моделирования движения крана по энергетическим, электрическим, динамическим и кинематическим показателям. Доказана эффективность использования предложенного оптимального закона движения крана.*

## **Abstract**

### **THE RESEARCH OF OPTIMAL CONTROL OF BRIDGE LIFTING CRANE**

Loveikin V., Romasevich Y.

*The solution of optimal control problem of bridge crane movement has been shown in the article. The analysis of crane movement simulation results has been carried out according to power, electrical, dynamical and kinematic indexes. Efficient using of proposed optimal law of crane movement has been proved.*