

УДК 621.873

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ КРАНІВ МОСТОВОГО ТИПУ

Нсженцев О.Б., Збітнєв П.В.

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF FREQUENCY CONTROL DURING BRAKING OF BRIDGE TYPE CRANES

Nyezhtsev O., Zbitniev P.

*Виконано пошук оптимальних параметрів частотного управління при гальмуванні мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т і прольотом 28,5 м. В якості критерію оптимізації прийнята узагальнена функція бажаності, яка містить: час гальмування крана, а також максимальні динамічні навантаження, що діють на металоконструкцію крана і на вантаж. Знайдені оптимальні параметри частотного управління дозволили знизити максимальні динамічні навантаження на металоконструкцію крана і горизонтальні динамічні навантаження, що діють на вантаж, відповідно, на 48,5% і 35,1% в порівнянні з гальмуванням крана в режимі противмикання. При цьому амплітуда розгойдування вантажу після зупинки крана зменшилась у 9 разів (при довжині підвісу вантажу 8 м).*

**Ключові слова:** мостовий кран, частотне управління, динамічні навантаження, оптимізація

**Вступ.** Все більше вантажопідйомних кранів випускаються з частотно-керованими електроприводами, що мають безперечні переваги в порівнянні з традиційним релейно-контакторним управлінням: більш широкий діапазон регулювання частоти обертання ротора (в тому числі - вище номінальної); висока точність і плавність регулювання швидкості механізмів; жорсткі механічні характеристики; значно менші втрати електроенергії; можливість використання більш дешевих і надійних короткозамкнених двигунів замість двигунів з фазним ротором. Однак, питання динаміки вантажопідйомних кранів з частотним управлінням (особливо у гальмівних режимах роботи) на сьогоднішній день залишаються досить малодослідженими.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Робота [1] присвячена пошуку законів оптимального управління механізмів пересування вантажопідіймальних машин. Авторами математично обґрунтовано спосіб усунення коливань вантажу при розгоні та сталому русі крана, а також синтезований раціональний спосіб управління рухом крана за допомогою

частотного перетворювача. Однак, в цій роботі розглянуто лише розгін і переміщення крана, а питання гальмування крана не досліджувалося, незважаючи на те, що розгойдування вантажу при зупинці і позиціонуванні крана є більш важливими, ніж при його розгоні.

В роботі [2] вирішена задача мінімізації середньоквадратичного значення зусилля, що діє в головній балці мостового крана, при переміщенні вантажу в горизонтальній площині. Але так само як і в попередній роботі розглянуто лише процес пуску крана.

Робота [3] присвячена пошуку оптимального керування рухом системи «кран із траверсною підвіскою - вантаж». Однак, знайдений закон має суттєві недоліки (знакозмінний характер швидкості та динамічної складової приводного зусилля, надзвичайно велика початкова величина динамічної складової приводного зусилля), які ставлять під сумнів можливість його реалізації у частотно-керованому крановому електроприводі.

У роботах [4 - 6] зроблено аналіз гальмівних процесів мостових кранів з частотно-керованим електроприводом пересування та визначено залежності динамічних навантажень при гальмуванні крана з частотним керуванням від зміни таких факторів як крок зміни частоти, час витримки на одній частоті та швидкість крана, на якій відключається двигун і спрацьовує колодкове гальмо. Однак, у цих роботах не вирішені задачі оптимізації процесу гальмування крана з частотним керуванням.

**Мета статті** – розвиток методики оптимізації та пошук оптимальних параметрів гальмування частотно-керованого крана мостового типу.

**Матеріали і результати досліджень.** Пошук оптимальних параметрів частотного керування електроприводу пересування крана здійснювався на прикладі мостового крана в/п 20/5 т за методом кругого сходження [7], що містить наступні етапи:

1. Виділення факторів, що визначають механічну характеристику приводу. В якості варійованих факторів були обрані: крок зміни частоти частотно-перетворювача ( $h_{ч}$ ) та час витримки на одній частоті ( $T_{в}$ ).

2. Вибір критерію оптимізації. Процес гальмування крана всебічно характеризується наступними величинами: максимальними значеннями динамічних навантажень на металоконструкцію крана  $P_M$ , горизонтальними динамічними навантаженнями  $P_K$ , що діють на вантаж і часом гальмування крану  $t_r$  з частотним управлінням приводу переміщення крану. Для вирішення багатопараметричної оптимізаційної задачі в якості узагальненого критерію використана узагальнена функція бажаності Харрінгтона  $D$  [7]. Для її побудови значення параметрів оптимізації  $P_M, P_K, t_r$  були перетворені в безрозмірну шкалу бажаності  $y^*$ , що дозволяє визначити відповідні їм приватні функції бажаності  $d_1, d_2, d_3$ . Узагальнена функція бажаності  $D$  являє собою середнє геометричне приватних функцій  $d_j$ :

$$D = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} \quad (1)$$

Для односторонніх обмежень виду  $y_j \geq y_j^{\min}$  (або  $y_j \leq y_j^{\max}$ ) перетворення функцій відгуку  $y_j$  в приватні функції бажаності  $d_j$  здійснюється за допомогою експоненціальної залежності (рис. 1) [7]:

$$d_j = \exp[-\exp(-y_j^*)], \quad (2)$$

де

$$y_j^* = a_{0j} + a_{1j} y_j. \quad (3)$$

Коефіцієнти  $a_{0j}$  і  $a_{1j}$  визначаються шляхом завдання двох значень кожної функції відгуку  $y_j$ , відповідним базовим значенням приватних функцій бажаності  $d_j$ . При цьому узагальнена і приватні функції бажаності змінюються від нуля до одиниці. Нуль відповідає абсолютно неприйнятному значенню параметра оптимізації, а одиниця - найкращому.

Для двостороннього обмеження виду  $t_{\min} \leq t_r \leq t_{\max}$  перетворення значень  $t_r$  у шкалу  $d_j$  проводиться за допомогою функції [7]:

$$d_j = \exp\left[-\left(\frac{t_r - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}\right)^w\right] \quad (4)$$

де

$$w = \frac{\ln(\ln(1/d_1^*))}{\ln\left[\frac{2 \cdot t_r^* - (t_{\max} + t_{\min})}{t_{\max} - t_{\min}}\right]}, \quad (5)$$

$$y' = \frac{2 \cdot t_r - (t_{\max} + t_{\min})}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (6)$$

Значенням бажаності  $d_1 = 0,37$  поставлені у відповідність наступні значення часу гальмування крана:  $t_{\min}$  - найменший час гальмування крана, при якому порушується контакт ходових коліс з рейками та починається рух юзом, с;  $t_{\max}$  - максимальний час гальмування крана, що визначається технологічним процесом, с;  $t_r^* = 8$  с поставлено у відповідність  $d_1^* = 0,8$ .

На рис. 1 представлені функції бажаності  $d_j$ , безрозмірна шкала  $y^*$ , а також шкали переведення параметрів оптимізації  $P_M, P_K, t_r$  в приватні функції бажаності  $d_1, d_2, d_3$  для мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т.

Тоді для зазначеного крана за допомогою виразів (2)-(6) одержимо залежності, що дозволяють перетворювати параметри оптимізації  $P_M, P_K, t_r$  в приватні функції бажаності  $d_1, d_2, d_3$ :

$$d_1 = \exp[-((2 \cdot t_r - (10 + 2))/(10 - 2))^{2,164}]; \quad (7)$$

$$d_2 = \exp[-\exp(-4,617 + 0,1 P_M)]; \quad (8)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(-4,365 + 0,174 P_K)]. \quad (9)$$

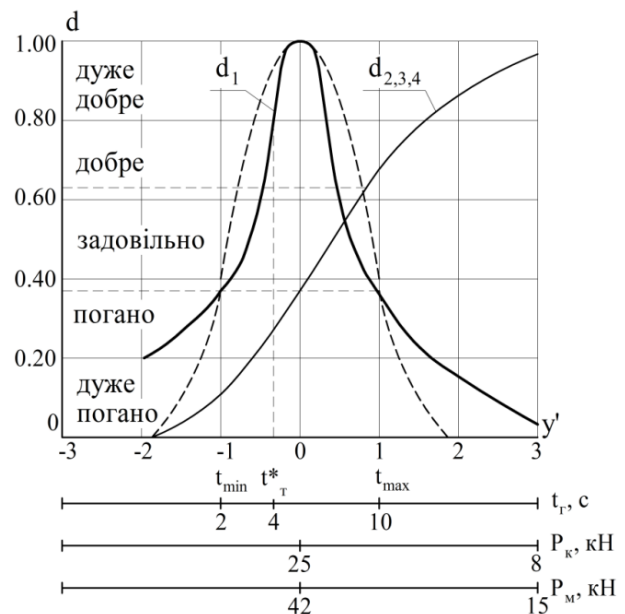


Рис. 1. Графік функції бажаності

3. Вибір математичної моделі мостового крану. Оскільки перехідні процеси вантажопідйомних кранів з достатньою для практичних розрахунків точністю описуються диференціальними рівняннями (10) [8, 9], то оптимізацію механічної характеристики електроприводу пересування вантажопідйомного крану в режимі частотно-керованого гальмування доцільно здійснювати за допомогою комп'ютерного експерименту на математичній моделі крану. Значення параметрів оптимізації  $P_M, P_K, t_r$  визначалися за результатами чисельного інтегрування (методом Рунге-Кутта) системи нелінійних диференціальних рівнянь (10), що описують процес гальмування мос-

тового крану, представленого тримасовою розрахунковою схемою (рис. 2) [8, 9]. При цьому максимальні значення змінних  $P_M$ ,  $P_K$  обчислювалися шляхом порівняння на кожному кроці інтегрування відповідно до і після зупинки крану.

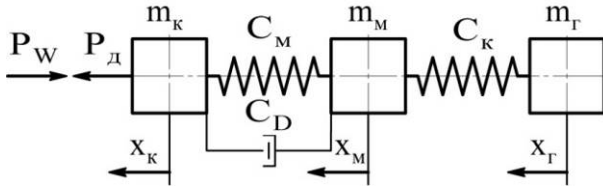


Рис. 2. Тримасова схема мостового крану

$$\begin{cases} m_k \ddot{x}_k + C_D(\dot{x}_k - \dot{x}_m) + \\ + C_M(x_k - x_m) = P_\Gamma - P_W \text{sign}(\dot{x}_k); \\ m_m \ddot{x}_m + C_K(x_m - x_g) - \\ - C_D(\dot{x}_k - \dot{x}_m) - C_M(x_k - x_m) = 0; \\ m_g \ddot{x}_g - C_K(x_m - x_g) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де  $m_k$  - приведені до переміщення коліс маса обертових частин привода і частина маси моста;  $m_m$  - приведена до середини прольоту маса середніх частин моста і порожнього візка;  $m_g$  - маса вантажу;  $C_M$  - коефіцієнт жорсткості металоконструкції крана в горизонтальній площині;  $C_D$  - коефіцієнт загасання коливань металоконструкції;  $C_K$  - горизонтальна складова натягу канатів при  $(x_m - x_g) = 1$ ;  $P_W$  - сила статичного опору пересуванню крану;  $x_k$ ,  $x_m$ ,  $x_g$  - шляхи, що проходять відповідні маси від початку координат;  $P_\Gamma$  - приведена до ходових коліс сила приводу в режимі гальмування.

При частотному управлінні зведена до ходових коліс сила приводу в режимі гальмування  $P_\Gamma$  (з урахуванням залежності моменту двигуна  $M$  від поточних фазної напруги статора, частоти і ковзання) визначається за виразом [10-12]:

$$P_\Gamma = M \frac{u_m}{r} \eta^{\pm 1} = \frac{2M_k(1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2a \cdot s_k} \cdot \frac{u_m}{r} \eta^{\pm 1}, \quad (11)$$

де  $u_m$  - передатне число привода;  $r$  - радіус ходового колеса;  $m$ ;  $\eta^{\pm 1}$  - коефіцієнт корисної дії механізму пересування крану (у руховому режимі знак «+», у гальмівних – знак «-»);  $M$  - момент двигуна, Н·м;  $M_k$  - критичний момент двигуна, Н·м, при частотному управлінні

$$M_k = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_1^2}{\omega_{0H} x_{kH} \left[ f_{1*} \rho_{1k} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1k}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)} \right]} \quad (12)$$

с і  $s_k$  - ковзання і критичне ковзання двигуна,

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{f_{1*} \cdot x_{kH}} \cdot \sqrt{\frac{f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2}{f_{1*}^2 + \rho_{1k}^2}}; \quad (13)$$

$a$  - коефіцієнт, що визначається за формулою

$$a = \frac{R_1 \cdot f_{1*}^2}{R'_2 \cdot (f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}; \quad (14)$$

$U_1$  - поточне значення фазної напруги, В:

$$U_1 = U_{1H} \sqrt{\frac{f_{1*} \rho_{1k} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1k}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}}{\rho_{1k} \pm \sqrt{(1 + \rho_{1k}^2)(1 + \rho_{1\mu}^2)}}} \cdot \frac{M_c}{M_H}, \quad (15)$$

$\omega_{0H}$  - синхронна швидкість двигуна при номінальній частоті  $f_{1H} = 50$  Гц, рад/с;  $x_{kH} = x_1 + x'_2$  - індуктивний фазний опір короткого замикання при номінальній частоті  $f_{1H} = 50$  Гц ( $x_1$  і  $x'_2$  - відповідно, індуктивний фазний опір обмоток статора і ротора, приведений до обмотки статора), Ом;  $f_{1*} = f_1 / f_{1H}$  - відносна частота струму статора ( $f_1$  і  $f_{1H}$  - поточне і номінальне значення частоти струму статора, відповідно, Гц);  $R_1$  і  $R'_2$  - активний фазний опір обмоток статора і ротора, приведений до обмотки статора, Ом;  $\rho_{1k} = R_1 / x_{kH}$  і  $\rho_{1\mu} = R_1 / x_{\mu H}$  - відносні величини ( $x_{\mu H}$  - індуктивний опір контуру намагнічування при номінальній частоті  $f_{1H} = 50$  Гц, Ом);  $U_{1H}$  - номінальне значення фазної напруги, В;  $M_c$  - момент статичного опору на валу двигуна, Н·м;  $M_H$  - номінальний момент на валу двигуна, Н·м.

4. Алгоритм пошуку оптимальної механічної характеристики кранового електроприводу в режимі частотно-керованого гальмування. Процес оптимізації на прикладі мостового крану в/п 20/5 т виконаємо методом крутого сходження [7]. Для цього апроксимуємо початкову локальну область простору  $D_j$ , поліномом

$$D = b_0 + \sum_{m=1}^k b_m z_m, \quad (16)$$

де  $D$  - оцінка узагальненого критерію, що апроксимується;  $z_m$  - кодовані значення варійованих факторів ( $h_{\text{ч}}$  і  $T_{\text{в}}$ );  $b_0, b_m$  - коефіцієнти регресії;  $k$  - число факторів.

У табл. 1 представлені умови проведення повного факторного експерименту типу  $2^k$ , а в табл. 2 - його результати.

Таблиця 1

**Рівні факторів та інтервали варіювання**

Рівні факторів та інтервали варіювання	$T_{в, с}$	$h_{ч, Гц}$
Код ( $z_m$ )	$z_1$	$z_2$
Основний рівень ( $z_m = 0$ )	0,13	1,2
Інтервал варіювання ( $\Delta z_m$ )	0,02	0,2
Верхній рівень ( $z_m = +1$ )	0,15	1,4
Нижній рівень ( $z_m = -1$ )	0,11	1,0

За результатами комп'ютерного експерименту розраховано коефіцієнти регресії за формулою:

$$b_m = (\sum_{i=1}^N z_{mi} D_i) / N, \quad (17)$$

$$m = 0, 1, \dots, k; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

і отримано рівняння регресії, що зв'язує узагальнений критерій з варійованими факторами

$$D = 0,81 + 0,062z_1 - 0,072z_2. \quad (18)$$

Оскільки нами проводився комп'ютерний експеримент, то перевірку адекватності рівняння регресії (18) неможливо здійснити за традиційним критерієм Фішера, оскільки помилка повторних «дослідів» в кожній точці плану (тобто помилка повторного обчислення на комп'ютері) практично дорівнює нулю і, отже, дисперсія дослідів також дорівнює нулю. Тому ступінь розсіювання оцінок узагальненого критерію оптимізації рівняння (18) і наступних рівнянь регресії оцінювалася коефіцієнтом варіації за формулою

$$\rho = \frac{1}{b_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - D_p)^2}{N - \lambda}} \leq \alpha, \quad (19)$$

де  $\lambda$  - число коефіцієнтів рівняння регресії;  $\alpha$  - рівень значущості (зазвичай приймають рівним 0,05). Рівняння регресії вважається адекватним, якщо  $\rho < \alpha$ . В даному випадку коефіцієнт варіації  $\rho$  виявився рівним 0,047, що свідчить про адекватність рівняння (18).

За базовий фактор було прийнято  $z_2$  з кроком руху у напрямку оптимуму  $h_2 = -0,05$  Гц. Для фактора  $z_1$  крок  $h_1$ , рівний 0,0043, розрахований за виразом:

$$\Delta_1 = \Delta_2 \cdot \frac{b_1 \cdot \Delta T_{в}}{b_2 \cdot \Delta h_{ч}} =$$

$$= -0,05 \cdot \frac{(0,062) \cdot 0,02}{-0,072 \cdot 0,2} = 0,0043. \quad (20)$$

Рух до оптимуму здійснювався від центру плану (основного рівня) по точках, координати яких визначалися за виразами:

$$h_{ч} = 1,2 - 0,05n; \quad T_{в} = 0,13 + 0,0043n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Результати серії дослідів крутого сходження, що наведені в табл. 3 показали: значення критерію D, отримане в четвертому досліді і рівне 0,910 вище, ніж найкращий результат в локальній області (0,894).

На рис. 3 та рис. 4 наведено графіки перехідних процесів мостового крана в/п 20/5 т в режимах, відповідно, гальмування противмиканням електродвигунів (рис. 3) та частотно-керованого гальмування за знайденою оптимальною характеристикою (рис. 4).

Таблиця 2

**План і результати повного факторного експерименту**

№	$z_1$	$z_2$	$T_{в, с}$	$h_{ч, Гц}$	$t_{Г, с}$	$P_{м, кН}$	$P_{к, кН}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d$	$D_p$
1	-1	-1	0,11	1,0	5,62	27,2	16,06	0,994	0,822	0,811	0,872	0,851
2	1	-1	0,15	1,0	7,46	22,47	12,23	0,893	0,890	0,898	0,894	0,894
3	-1	1	0,11	1,4	4,38	38,4	22,15	0,868	0,512	0,546	0,624	0,646
4	1	1	0,15	1,4	5,51	29,2	16,51	0,989	0,784	0,798	0,852	0,833

Таблиця 3

**Серія дослідів крутого сходження**

№	$T_{в, с}$	$h_{ч, Гц}$	$t_{Г, с}$	$P_{м, кН}$	$P_{к, кН}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$D$
1	0,130	1,20	5,56	28,15	16,32	0,992	0,805	0,803	0,862
2	0,1343	1,15	5,90	26,2	15,24	1,00	0,838	0,834	0,888
3	0,1386	1,10	6,33	24,5	14,24	0,995	0,865	0,859	0,904
4	0,1429	1,05	6,80	22,9	13,30	0,970	0,885	0,879	0,910
6	0,1472	1,00	7,32	22,4	12,43	0,913	0,891	0,895	0,900

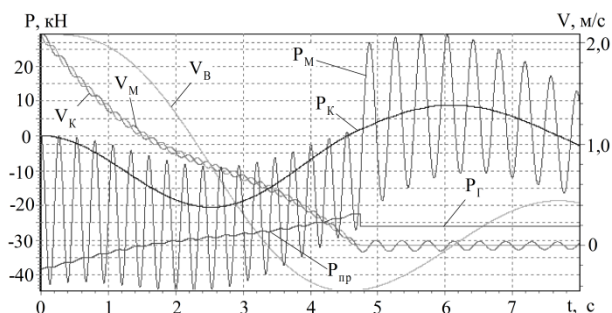


Рис. 3. Графіки процесу гальмування мостового крана в/п 20/5 т в режимі противмикання

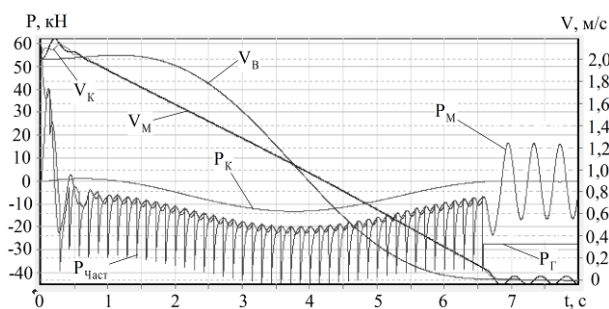


Рис. 4. Графіки процесу гальмування мостового крана в/п 20/5 т в режимі частотно-керованого гальмування за оптимальною характеристикою

Аналіз графіків на рис. 3 і рис. 4 показує, що оптимізація механічних характеристик приводу пересування крана з частотним керуванням виявилася дуже успішною та дозволила знизити максимальну величину горизонтальних динамічних навантажень на металоконструкцію крана  $P_M$  і горизонтальних динамічних навантажень  $P_K$ , що діють на вантаж, відповідно, на 18,7% та на 18,5% у порівнянні з основним рівнем (табл. 3, дослід 1).

Порівняння ж отриманих результатів з гальмуванням крана в режимі противмикання показав зменшення максимальної величини горизонтальних динамічних навантажень на металоконструкцію крана  $P_M$  і горизонтальних динамічних навантажень  $P_K$ , що діють на вантаж, відповідно на 48,5% та на 35,1%, а амплітуда розгойдування вантажу після зупинки крана при цьому зменшилась у 9 разів та склала лише 15 мм при довжині підвісу вантажу 8 м.

**Висновки.** 1. Розроблена методика оптимізації механічних характеристик кранового електроприводу є ефективним інструментом підвищення техніко-економічних показників вантажопідійомних кранів і може застосовуватися як для кранів, що експлуатуються так і для машин, які знаходяться на стадії проектування.

2. Істотно знизити динамічні навантаження і підвищити продуктивність вантажопідійомних кранів можна шляхом оптимізації механічних характеристик електроприводу пересування за узагальненим критерієм, що містить параметри динамічних навантажень і продуктивності.

3. В результаті оптимізації параметрів частотного керування мостового крана в/п 20/5 т, вдалося знизити динамічні навантаження на металоконструкцію крана на 35- 48%, а амплітуду розгойдування вантажу після зупинки крана - в 9 разів у порівнянні з гальмуванням противмиканням.

### Література

1. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація режиму руху кранового механізму переміщення / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Підйомно-транспортна техніка. - 2013. - № 3. - С. 5 - 21.
2. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана за критерієм середньоквадратичного значення зусилля у мостовій балці / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, В.В. Крушельницький // Підйомно-транспортна техніка. - 2015. - № 3. - С. 27 - 35.
3. Ловейкін В.С. Оптимізація руху вантажопідійомного крана із траверсною підвіскою вантажу методом динамічного програмування / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Машинобудування. - 2012. - № 10. - С. 15 - 32. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud\\_2012\\_10\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud_2012_10_4).
4. Збітнев П.В. Зниження динамічних навантажень при гальмуванні мостового крана з частотним керуванням / П.В. Збітнев, О.Б. Неженцев // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17-18 листоп. 2016.) / Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. - Тернопіль: ТНТУ, 2016. - С. 207 - 208.
5. Збітнев П.В. К вопросу снижения динамических нагрузок при торможении частотно-управляемого мостового крана / П.В. Збитнев, А.Б. Неженцев // Майбутній науковець – 2016: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 2 груд. 2016 р., м. Северодонецьк. Ч.ІІ. – Северодонецьк: Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля, 2016. – С. 102-105.
6. Zbitniev P. Analysis of the dependence between loads of an overhead crane and the parameters of a frequency control / P. Zbitniev, O. Nyzhentsev // International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2016», 16-18 of November 2016 in KNUGA. – Kyiv: KNUGA, 2016. – P. 181.
7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
8. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
9. Неженцев А.Б. Оптимизация механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме двухступенчатого противовключения / А.Б. Неженцев, П.В. Збитнев // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту ім. В.Даля, №7(224). – Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2015. – С. 36-42.
10. Основы автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
11. Збітнев П.В. Математическая модель приведенной силы электропривода крана с частотным управлением / П.В. Збитнев, А.Б. Неженцев // Молода наука. Технологія машинобудування: збірник наукових праць всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих вчених / за заг. ред. С.В. Ковалевського, д-ра техн. наук, проф. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – С. 85-87.

12. Збітнев П.В. Математична модель приведеної сили електропривода крана з частотним управлінням / П.В. Збітнев, О.Б. Неженцев // Тези доповідей всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді - машинобудуванню». Секція «Машинобудування», підсекція «Прикладна механіка». – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 23 - 25.

### References

1. Loveikin V.S. Dynamichna optymizatsiia rezhymu rukhu kranovoho mekhanizmu peremishchennia / V.S. Loveikin, Iu.O. Romasevych // Pidomno-transportna tekhnika. - 2013. - № 3. - S. 5-21.
2. Loveikin V.S. Optymizatsiia perekhidnoho protsesu posku mekhanizmu peremishchennia mostovoho kрана za kryteri-iem serednokvadratynoho znachennia zusyillia u mostovii baltsi / V.S. Loveikin, Iu.O. Romasevych, V.V. Krushelny-tskiy // Pidomno-transportna tekhnika. - 2015. - № 3. - S. 27-35.
3. Loveikin V.S. Optymizatsiia rukhu vantazhopidomnoho kрана iz traversnoi pidviskoiu vantazhu metodom dynamichnoho prohramuvannia / V.S. Loveikin, Iu.O. Romasevych // Mashynobuduvannia. - 2012. - № 10. - S. 15-32. - Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud\\_2012\\_10\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud_2012_10_4).
4. Zbitniev P.V. Znyzhennia dynamichnykh navantazhen pry halmuvanni mostovoho kрана z chastotnym keruvanniam / P.V. Zbitniev, O.B. Niezhentsev // Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii : zb. tez dopovidei mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Molodykh uchenykh ta studentiv, (Ternopil, 17–18 lystop. 2016.) / Tern. natsion. tekhn. un-t im. I. Puliui [ta in]. – Ter-nopil: TNTU, 2016. – S. 207-208.
5. Zbitniev P.V. K voprosu snyzheniia dynamycheskykh nahruzok pry tormozhenii chastotno-upravliaemoho mostovoho kрана / P.V. Zbitniev, A.B. Nezhentsev // Maibutnii na-ukovets – 2016: materialy vseukr. nauk.-prakt. konf. 2 hrud. 2016 r., m. Sievierodonetsk. Ch.II. – Sievierodonetsk: Skhidnoukr. nats. un-t im. V.Dalia, 2016. – S. 102-105.
6. Zbitniev P. Analysis of the dependence between loads of an overhead crane and the parameters of a frequency control / P. Zbitniev, O. Nyezhenyev // International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2016», 16-18 of November 2016 in KNUGA. – Kyiv: KNUGA, 2016. – P. 181.
7. Adler Ju.P. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovij / Ju.P. Adler, E.V. Markova, Ju.V. Granovskij. – M.: Nauka, 1976. – 279 s.
8. Lobov N.A. Dinamika gruzopodemnykh kранov / N.A. Lobov. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 160 s.
9. Nezhentsev A.B. Optymizatsiia mekhanicheskikh harakteristik privoda peredvizheniia mostovoho kрана v rezhime dvuhstupenchatogo protivovkljuchenija / A.B. Nezhentsev, P.V. Zbitniev // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho un-tu im. V.Dalia, №7(224). – Sievierodonetsk: Vyd-vo SNU im. V.Dalia, 2015. – S. 36-42.
10. Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Ucheb. posobie dlja vuzov / M.G. Chilikin, M.M. Sokolov, V.M. Terehov, A.V. Shinjanskij. – M.: Energija, 1974. – 568 s.
11. Zbitniev P.V. Matematicheskaja model' privedennoj sily jelektroprivoda kрана s chastotnym upravleniem / P.V. Zbitniev, A.B. Nezhentsev // Moloda nauka. Tekhnolohiia mashynobuduvannia: zbirnyk naukovykh prats vseukrainskoi naukovykh-konferentsii studentiv i molodykh vchenykh / za zah. red. S.V. Kovalevskoho, dra tekhn. nauk, prof. – Kramatorsk: DDMA, 2016. – С. 85-87.

12. Zbitniev P.V. Matematychna model pryvedenoj sily elektroprivoda kрана z chastotnym upravlinniam / P.V. Zbitniev, O.B. Niezhentsev // Tezy dopovidei vseukrainskoi nauk.-tekhn. konf. molodykh vchenykh ta studentiv «Innovatsii molodi - mashynobuduvanniu». Sektsiia «Mashynobuduvannia», pidseksiia «Prykladna mekhanika». – K.: NTUU «KPI», 2016. – S. 23-25.

### Неженцев А.Б., Збитнев П.В. Оптимизация параметров частотного управления при торможении крана мостового типа

*Выполнен поиск оптимальных параметров частотного управления при торможении мостового крана грузоподъемностью 20/5 т и пролетом 28,5 м. В качестве критерия оптимизации принята обобщенная функция желательности, которая содержит: время торможения крана, а также максимальные динамические нагрузки, действующие на металлоконструкцию крана и на груз. Найденные оптимальные параметры частотного управления позволили снизить максимальные динамические нагрузки на металлоконструкцию крана и горизонтальные динамические нагрузки, действующие на груз, соответственно, на 48,5% и 35,1% по сравнению с торможением крана в режиме противовключения. При этом амплитуда раскачивания груза после остановки крана уменьшилась в 9 раз (при длине подвеса груза 8 м).*

**Ключевые слова:** мостовой кран, частотное управление, динамические нагрузки, оптимизация.

### Nyezhenyev O., Zbitniev P. Optimization of parameters of frequency control during braking of bridge type cranes

*A growing number of cranes are available with a frequency-controlled electric drives today, which have undoubted advantages over the traditional relay-contactor control. But the dynamics issues of braking modes of frequency-controlled cranes are still unresolved. So, searching of optimal parameters of braking of frequency-controlled bridge crane carrying capacity 20 t and a span of 28.5 m was performed. Optimizing was performed on the nonlinear mathematical model of the bridge crane, which was submitted as a three-mass design scheme. Method of steep ascension was applied to this end. The desirability of a generalized function, which comprising deceleration time of the crane, maximum dynamic loads arising in metal construction and on cargo during braking was adopted as an optimization criterion. The best parameters of the frequency converter were found. It have allowed to reduce dynamic loads arising in the metal structure of the crane for 48,5% and dynamic loads arising on cargo decreased for 35,1%. The amplitude of sway of cargo decreased of nine compared with the braking in the plugging brake mode.*

**Keywords:** bridge crane, frequency control, dynamic loads, optimization.

**Неженцев О.Б.** – к.т.н., доцент кафедри прикладної механіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, e-mail: [nezhentsev@meta.ua](mailto:nezhentsev@meta.ua)  
**Збітнев П.В.** – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту і підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В.Далія, м. Северодонецьк, Україна, e-mail: [zbitniev@gmail.com](mailto:zbitniev@gmail.com)

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**