

# Методика розрахунку та дослідження динамічних навантажень і втрат енергії при роботі механізму підйому мостового крана

О. Б. Неженцев<sup>1</sup> • О. П. Кравченко<sup>2</sup> • Г. О. Бойко<sup>3</sup> • І. О. Цимбаленко<sup>1</sup>

Received: 11 September 2024 / Revised: 15 October 2024 / Accepted: 10 December 2024

**Анотація.** Об'єктом дослідження є вантажопідйомні крани мостового типу.

В роботі вирішується проблема зниження динамічних навантажень та енергоспоживання вантажопідіймальних кранів завдяки удосконаленню методики розрахунку втрат енергії та динамічних навантажень в період підйому вантажу. Математична модель крана враховує всі основні параметри електромеханічної системи “привід – металокопструкція – вантаж”. Розроблено методику для дослідження динамічних навантажень та втрат енергії під час роботи механізму підйому мостових кранів. Наведено результати дослідження динамічних навантажень та втрат енергії мостовими кранами вантажопідіймністю 5 т прольотами від 19,5 до 31,5 м залежно від висоти підйому вантажу, маси вантажу, прольоту крана та інших факторів, що дозволило підвищити точність розрахунків на 13–25 %.

Аналіз результатів досліджень показав, що втрати енергії значною мірою залежать від висоти підйому, маси вантажу, механічних характеристик електроприводу, моменту інерції ротора електродвигуна і муфт на швидкохідному валу. Результати досліджень можуть бути застосовані при розрахунках, проектуванні та експлуатації мостових кранів.

**Ключові слова:** вантажопідйомний кран, механізм підйому, методика розрахунку, математична модель, динамічні навантаження, втрати енергії.

## Вступ

Дослідження перехідних процесів при підйомі вантажів кранами мостового типу та пошук шляхів зниження втрат енергії ґрунтуються на розрахункових та експериментальних методах визначення динамічних та енергетичних параметрів кранових електроприводів. Для їх виконання необхідно використовувати методику розрахунку, що містить математичні моделі, які найбільш повно враховують усі основні фактори електромеханічної системи “електропривод – металокопструкція – вантаж”. Проведені дослідження [1]–[6] показали, що проблема зниження втрат енергії у вантажопідйомних кранах повинна вирішуватися разом із зав-

данням зниження динамічних навантажень та підвищення продуктивності кранів, оскільки покращення одних показників призводить до погіршення інших.

Особливістю механізмів підйому кранів, на відміну від механізмів пересування, є те, що приведена до канатів маса частин механізму, що обертаються, на порядок перевищує масу вантажу. Тому втрати енергії в електроприводі підйому головним чином залежать від моменту інерції ротора двигуна, муфт і гальмового шківа, розташованих на швидкохідному валу. У меншій мірі вони залежать від маси вантажу. Як показали наші дослідження відмінність втрат енергії при підйомі номінального вантажу і порожнього гака не перевищує 25 %. Внаслідок цього, а, також зважаючи на те, що головним пріоритетом при експлуатації вантажопідйомних кранів є безпека функціонування їх механізмів і несучих металокопструкцій при зростанні робочих швидкостей та інтенсифікації вантажно-розвантажувальних робіт, найбільш важливе завдання – зниження динамічних зусиль у перехідних процесах при роботі механізму підйому. При цьому продуктивність крана повинна бути максимальною, а енергоспоживання – якомога меншим.

✉ О.Б. Неженцев  
nezhentsev007@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет,  
Вінниця, Україна

<sup>3</sup> Східноукраїнський національний університет  
ім. Володимира Дала, Київ, Україна,

Оскільки проблему підвищення ефективності енергоспоживання вантажопідіймальних кранів неможливо вирішити без удосконалення методики розрахунку втрат енергії та динамічних навантажень, то розробка відповідної методики розрахунку та адекватної математичної моделі, що описує перехідні процеси кранового електроприводу підйому, є актуальною.

Дослідженню перехідних процесів при підйомі вантажів мостовими кранами присвячено багато публікацій [1]–[7] та інші. Однак більшість досліджень проведено на спрощених математичних моделях, що не дозволяє врахувати всі основні фактори, що впливають на динамічні навантаження, параметри продуктивності кранів та втрати енергії у кранових механізмах. Нелінійні характеристики кранових електроприводів зумовлюють застосування чисельних методів для дослідження динамічних та енергетичних показників вантажопідіймальних кранів. Це дозволяє використовувати складні математичні моделі крана, які найбільш повно описують перехідні процеси електромеханічної системи “привід – металоконструкція – вантаж”.

У роботах з теорії електроприводу [8]–[12] як правило, використовують спрощений підхід, що ґрунтується на розгляді машини у вигляді одномасової моделі. При цьому момент двигуна та швидкість робочого органу часто приймаються постійними. Це не дозволяє досліджувати вплив в'язкопружних властивостей металоконструкції крана та вантажних канатів, зазорів та інших факторів на втрати енергії при перехідних процесах.

Таким чином, для механізму підйому вантажу не розроблено методики, що ґрунтується на нелінійній математичній моделі “електропривід – металоконструкція – вантаж”, яка враховує всі основні фактори електромеханічної системи. Також відсутні переконливі дані щодо впливу різних факторів на втрати енергії під час підйому вантажу.

### Мета і задачі дослідження

Метою роботи є удосконалення методики, що базується на нелінійній математичній моделі вантажопідіймального крана, для розрахунку динамічних навантажень та втрат енергії під час підйому вантажу, яка враховує всі основні параметри електромеханічної системи “привід – металоконструкція – вантаж”; дослідити вплив висоти підйому вантажу, маси вантажу, прольоту крана та інших факторів на втрати енергії та динамічні навантаження мостових кранів вантажопідіймальною 5 т прольотами від 19,5 до 31,5 м.

### Матеріали та методи дослідження

Методи дослідження: теоретична механіка; теорія електроприводу; математичне моделювання перехідних процесів вантажопідіймальних кранів як складних електромеханічних систем; інтегральне та диференціальне обчислення; чисельний метод інтегрування диференціальних рівнянь Рунге-Кутта; розроблені комп'ютерні програми на мові Делфі; теорія планування експерименту; статистична обробка результатів експерименту.

### Результати дослідження

1. Математична модель мостового крана для дослідження динамічних навантажень та втрат енергії при роботі механізму підйому.

Для дослідження перехідних процесів при підйомі вантажів мостовими кранами застосовуємо тримасову динамічну модель (див. рис. 1) [2], [6], [13] і ін.

При підйомі вантажу “з підхопленням” мостовим краном перехідні процеси описуються наступними диференціальними рівняннями [1], [13], [14]:

– перший етап (вибір зазорів у механізмі і слабкості канатів, рис. 1 а):

$$m_{\text{п}} \cdot \ddot{y}_{\text{п}} - P_{\text{д}} = 0; \quad (1)$$

– другий етап (зміна зусилля в канатах від нуля до величини, що дорівнює силі ваги вантажу, рис. 1 б):

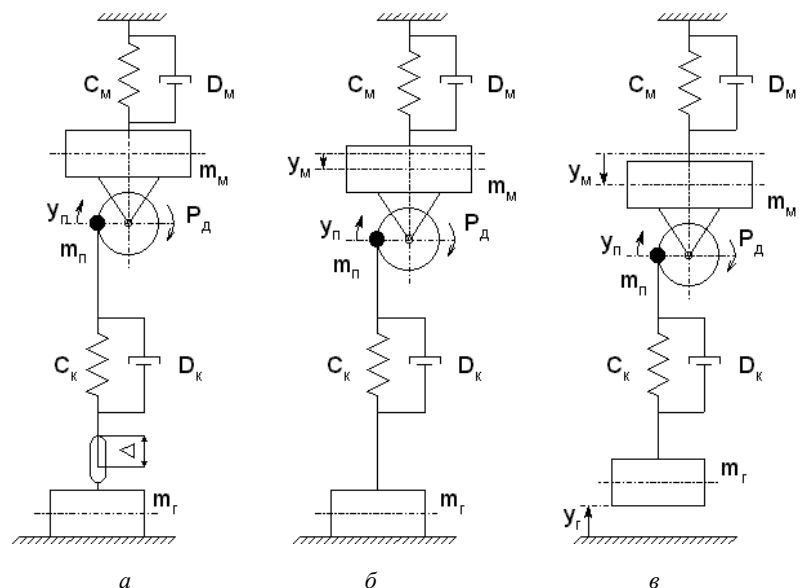


Рис. 1. Тримасова динамічна модель мостового крана при підйомі вантажу

$$\begin{cases} m_{II} \ddot{y}_{II} + D_K (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M) + C_K (y_{II} - y_M) - P_D = 0; \\ m_M \ddot{y}_M - D_K (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M) - C_K (y_{II} - y_M) + \\ + D_M \dot{y}_M + C_M y_M = 0; \end{cases} \quad (2)$$

– третій етап (після відриву вантажу від основи, рис. 1 в):

$$\begin{cases} m_{II} \ddot{y}_{II} + D_K (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_G) + C_K (y_{II} - y_M - y_G) - P_D = 0; \\ m_M \ddot{y}_M - D_K (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_G) - C_K (y_{II} - y_M - y_G) + \\ + D_M \dot{y}_M + C_M y_M = 0; \\ m_G \ddot{y}_G - D_K (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_G) - C_K (y_{II} - y_M - y_G) + m_G g = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $m_{II}$  – приведена до канатів маса частин механізму підйому вантажу, що обертаються;  $m_M$  – приведена до середини прольоту маса середніх частин моста і порожнього візка;  $m_G$  – маса вантажу;  $C_M$  – коефіцієнт жорсткості металокопункції крана;  $D_M$  – коефіцієнт загасання коливань (демпфування) металокопункції;  $C_K$  – коефіцієнт жорсткості вантажних канатів;  $D_K$  – коефіцієнт загасання коливань (демпфування) у каналах;  $y_{II}$ ,  $y_M$ ,  $y_G$  – шляхи, що проходять відповідні маси  $m_{II}$ ,  $m_M$ ,  $m_G$  від початку координат;  $P_D$  – приведена до канатів сила електропривода підйому, що визначається за формулою:

$$P_D = \frac{K_j \cdot (V_0 - \dot{y}_{II})}{B_j + (V_0 - \dot{y}_{II})^2}, \quad (4)$$

тут крім раніше зазначених величин:  $\dot{y}_{II}$  – швидкість маси привода  $m_{II}$ , що відповідає поточній частоті обертання двигуна;  $u_M$  – передаточне число механізму підйому (включаючи кратність поліспасти);  $r_b$  – радіус барабана.

2. Методика розрахунку втрат енергії і дослідження перехідних процесів при підйомі вантажів.

Втрати потужності в асинхронному електродвигуні [8]–[12]:

$$\Delta N = \Delta N_c + \Delta N_v, \quad (5)$$

де  $\Delta N_c$  – постійні втрати потужності;

$$\Delta N_c = \Delta N_{mex} + \Delta N_{стал} + 3I_{\mu}^2 R_1 + \Delta N_{дон}; \quad (6)$$

$\Delta N_{mex}$  – механічні втрати потужності від тертя в підшипниках і вентиляційні втрати;  $\Delta N_{стал}$  – втрати в сталі магнітопроводу,  $3I_{\mu}^2 R_1$  – втрати в міді статора від струму, що намагнічує  $I_{\mu}$ ;  $R_1$  – активний опір обмотки статора;  $\Delta N_v$  – змінні втрати потужності;

$$\Delta N_v = \Delta N_{v2} + \Delta N_{v1} = P_D V_0 s (1 + R_1 / R_2'); \quad (7)$$

$\Delta N_{v1}$  і  $\Delta N_{v2}$  – змінні втрати потужності відповідно в обмотці статора та у ланцюзі ротора;  $s$  – ковзання;

$R_2' = r_p' + R_0'$  – приведений активний опір фази ротора, що складається з опору обмотки ротора  $r_p'$  та опору додаткових резисторів  $R_0'$ .

Сумарні втрати енергії в асинхронному двигуні при перехідному процесі:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\Sigma} &= \Delta A_c + \Delta A_{v1} + \Delta A_{v2} = \\ &= \int_0^{t_{mn}} \Delta N_c dt + \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \int_0^{t_{mn}} P_D (V_0 - \dot{y}_{II}) dt, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Delta A_c$ ,  $\Delta A_{v1}$  і  $\Delta A_{v2}$  – втрати енергії, зумовлені, відповідно, постійними втратами, змінними втратами в статорі та роторі;  $t_{mn}$  – час перехідного процесу.

Змінні втрати потужності в асинхронному двигуні на першому етапі

$$\Delta N_v^I = \Delta N_{v2}^I + \Delta N_{v1}^I = P_D^I V_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right). \quad (9)$$

Змінні втрати енергії в роторі двигуна на першому етапі:

$$\Delta A_{v2}^I = \int_0^{t_I} \Delta N_{v2}^I dt = \int_0^{t_I} P_D^I V_0 s dt = m_{II} \int_0^{t_I} \ddot{y}_{II} (V_0 - \dot{y}_{II}) dt. \quad (10)$$

Сумарні втрати енергії в асинхронному двигуні на першому етапі:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\Sigma}^I &= \Delta A_c^I + \Delta A_{v1}^I + \Delta A_{v2}^I = \int_0^{t_I} \Delta N_c^I dt + \\ &+ \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) m_{II} \int_0^{t_I} \ddot{y}_{II} (V_0 - \dot{y}_{II}) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Змінні втрати енергії в роторі двигуна на другому етапі:

$$\begin{aligned} \Delta A_{v2}^{II} &= \int_{t_I}^{t_{II}} \Delta N_{v2}^{II} dt = \int_{t_I}^{t_{II}} P_D^{II} (V_0 - \dot{y}_{II}) dt = \\ &= m_{II} V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_{II} dt + m_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_M dt + D_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M dt + \\ &+ C_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} y_M dt - m_{II} \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_{II} \dot{y}_{II} dt - m_M \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_M \dot{y}_M dt - \\ &- D_M \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M \dot{y}_{II} dt - C_M \int_{t_I}^{t_{II}} y_M \dot{y}_{II} dt \end{aligned} \quad (12)$$

Сумарні втрати енергії в асинхронному двигуні на другому етапі:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\Sigma}^{II} &= \Delta A_c^{II} + \Delta A_{v1}^{II} + \Delta A_{v2}^{II} = \\ &= \int_{t_I}^{t_{II}} \Delta N_c^{II} dt + \Delta A_{v2}^{II} (1 + R_1 / R_2'). \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta A_{v2}^{III} = & \int_{t_{II}}^{t_{III}} \Delta N_{v2}^{III} dt = \int_{t_{II}}^{t_{III}} P_{\Delta}^{III} (V_0 - \dot{y}_{II}) dt = m_{II} V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_{II} dt + m_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_M dt + D_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M dt + C_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} y_M dt + \\ & + m_{\Gamma} V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_{\Gamma} dt - D_K V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_{\Gamma}) dt - C_K V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} (y_{II} - y_M - y_{\Gamma}) dt - m_{\Gamma} g \int_{t_{II}}^{t_{III}} (V_0 - \dot{y}_{II}) dt - m_{II} \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_{II} \dot{y}_{II} dt - \\ & - m_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_M \dot{y}_{II} dt - D_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M \dot{y}_{II} dt - C_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} y_M \dot{y}_{II} dt - m_{\Gamma} \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_{\Gamma} y_{II} dt + D_K \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_{II} (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_{\Gamma}) dt + \\ & + C_K \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_{II} (y_{II} - y_M - y_{\Gamma}) dt \end{aligned} \quad (14)$$

Змінні втрати енергії в роторі двигуна на третьому етапі (14).

Сумарні втрати енергії в асинхронному двигуні на третьому етапі:

$$\Delta A_{\Sigma}^{III} = \Delta A_c^{III} + \Delta A_{v1}^{III} + \Delta A_{v2}^{III} = \int_{t_{II}}^{t_{III}} \Delta N_c^{III} \cdot dt + \Delta A_{v2}^{III} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (15)$$

Втрати енергії за весь період підйому вантажу:

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_{\Sigma}^I + \Delta A_{\Sigma}^{II} + \Delta A_{\Sigma}^{III}. \quad (16)$$

Інтегрування диференціальних рівнянь (1)–(4) і (10)–(16) чисельним методом за допомогою розробленої багатофункціональної комп'ютерної програми [13] дозволяє з високою точністю розраховувати значення та будувати графіки всіх компонентів втрат енергії, а також переміщень, швидкостей і прискорень приведенних мас, зусиль металокопункції і канатів при підйомі вантажу в рухомих і гальмових режимах.

Розроблена методика розрахунку та дослідження втрат енергії при роботі механізму підйому кранів мостового типу базується на поєднанні детермінованого підходу з використанням багатомасової динамічної моделі крана, що враховує всі основні параметри електромеханічної системи “електропривод – металокопункція – вантаж” і теорії планування експерименту. Методика містить наступні етапи:

- розробка математичної моделі крана мостового типу при підйомі та опусканні вантажу;
- вибір факторів, встановлення областей їх визначення та інтервалів варіювання, кодування факторів;
- вибір виду регресійної моделі;
- вибір плану експерименту;
- проведення комп'ютерного експерименту;
- визначення коефіцієнтів регресії і перевірка адекватності моделі;
- багатофакторний аналіз втрат енергії та динамічних зусиль при роботі механізмів підйому вантажів кранами мостового типу.

3. Аналіз динамічних навантажень і втрат енергії при підйомі вантажів мостовими кранами вантажністю 5 т за розробленою методикою

За розробленою методикою були досліджені динамічні навантаження та втрати енергії при підйомі ван-

тажів мостовими кранами різної вантажопідйомності. Зокрема досліджені перехідні процеси при підйомі вантажів мостовими кранами вантажопідйомністю 5 т.

За допомогою розробленої багатофункціональної комп'ютерної програми [13] проінтегровані диференціальні рівняння (1)–(4), (10)–(16) чисельним методом і побудовані графіки зміни зусиль і втрат енергії при підйомі вантажів мостовим краном вантажопідйомністю 5 т залежно від механічних характеристик (див. рис. 2, 3). Графіки побудовані для підйому вантажу на висоту 8 м.

На рис. 2, 3 крім зазначених раніше величин прийняті наступні позначення:

- зусилля в металокопункції крана  $S_M$ :

$$S_M = D_M \cdot \dot{y}_M + C_K \cdot y_M; \quad (17)$$

- зусилля у вантажних канатах  $S_K$  на другому та третьому етапах, відповідно:

$$S_K = D_K \cdot (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M) + C_K \cdot (y_{II} - y_M), \quad (18)$$

$$S_K = D_K \cdot (\dot{y}_{II} - \dot{y}_M - \dot{y}_{\Gamma}) + C_K \cdot (y_{II} - y_M - y_{\Gamma}); \quad (19)$$

Підкреслимо, що при підйомі вантажу мостовим краном в/п 5 т на робочу висоту (в даному випадку – 8 м) тривалість перехідних процесів становить 10–12 % від часу розгону. Решту часу механізм підйому працює в сталому режимі з практично постійними швидкостями, що залежать від механічних характеристик електродвигуна. Отже, втрати енергії в приводі механізму підйому не залежать від механічних характеристик двигуна тільки протягом приблизно 1 секунди. У час, що залишився (приблизно 7–9 с, що становить 88–90 %) втрати енергії в приводі механізму підйому істотно залежать від механічних характеристик електродвигуна.

Для механізму підйому мостового крана в/п 5 т величина втрат енергії в приводі при підйомі номінального вантажу на висоту 8 м по різних механічних характеристиках може відрізнятися більш ніж в 2,3 рази (див. рис. 3).

За допомогою розробленої методики були проведені багатофакторні дослідження та отримано рівняння регресії для розрахунку втрат енергії в асинхронних електроприводах підйому мостових кранів в/п 5 т, що експлуатуються в цей час в Україні.

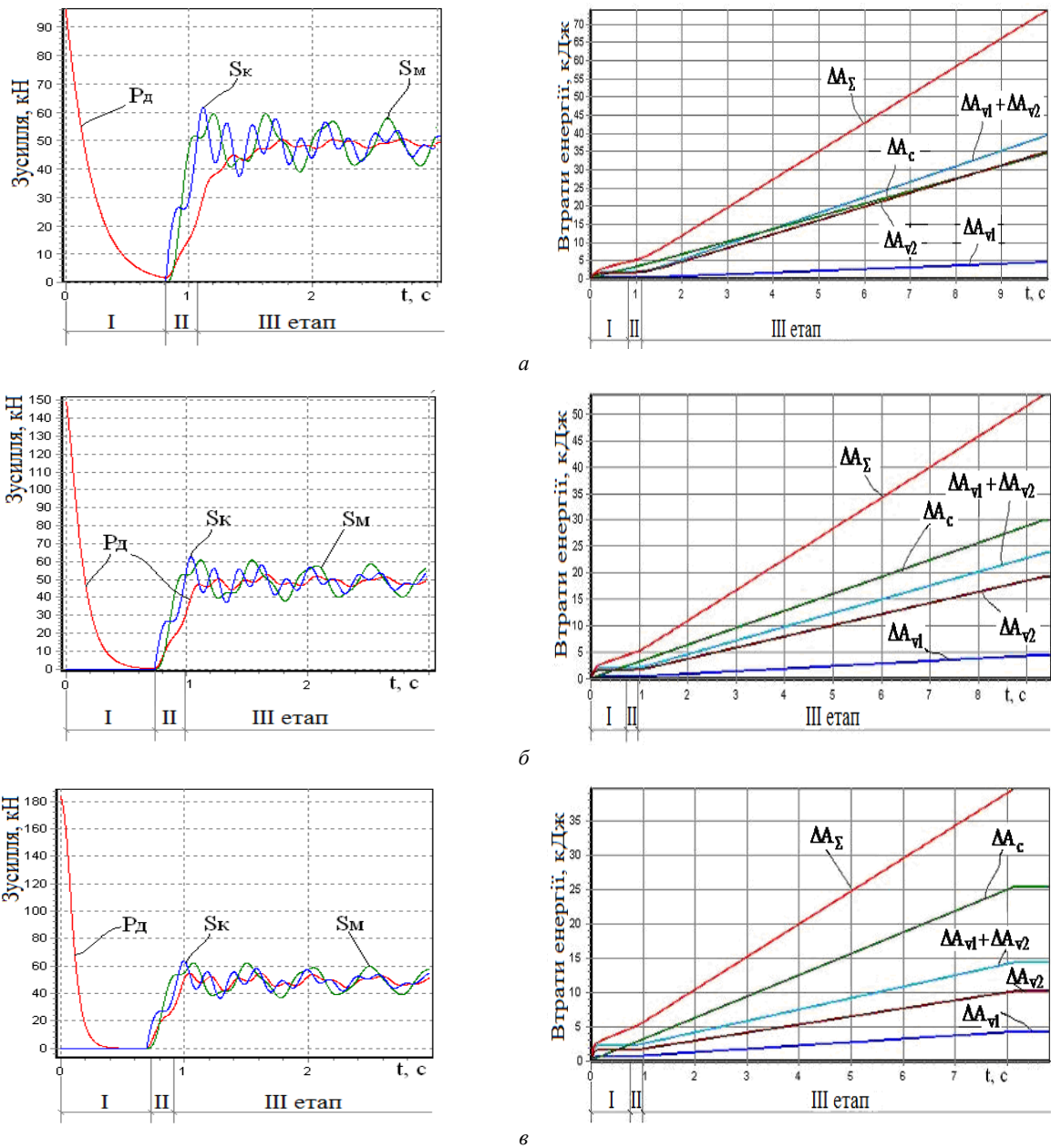


Рис. 2. Графіки динамічних зусиль і втрат енергії при підйомі вантажу мостовим краном в/п 5 т по механічним характеристикам: а – по першій; б – по другій; в – по третій

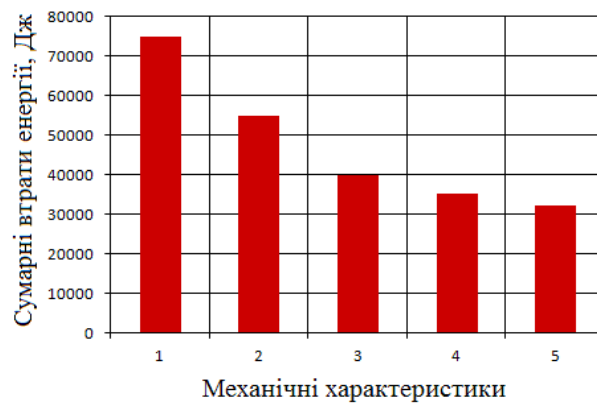


Рис. 3. Залежність втрат енергії в приводі підйому мостового крана в/п 5 т від механічних характеристик



$$\begin{aligned} \Delta \hat{A}_{\Sigma} = & 122918,28 + 147653,2x_1 + 63402,02x_2 - \\ & - 123907,5x_3 + 180,9x_1^2 - 57,5x_2^2 - 48339,4x_3^2 + \\ & + 32791,6x_1x_2 - 240,2x_1x_3 + 365,2x_2x_3, \end{aligned} \quad (20)$$

де  $x_1$ ,  $x_2$  і  $x_3$  – кодовані значення варійованих факторів, відповідно: висоти підйому вантажу  $H$ , маси вантажу  $m_{\Gamma}$  і номера механічної характеристики  $M.X$ , по якій здійснюється підйом вантажів.

Кодовані значення факторів  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  і натуральні значення  $H$ ,  $m_{\Gamma}$ ,  $M.X$  пов'язані наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} x_1 = \frac{H - H_0}{\Delta H}; \quad x_2 = \frac{m_{\Gamma} - m_{\Gamma 0}}{\Delta m_{\Gamma}}; \\ x_3 = \frac{M.X - M.X_0}{\Delta M.X} \end{aligned} \quad (21)$$

де  $H_0$ ,  $m_{\Gamma 0}$ ,  $M.X_0$  – основні рівні відповідних факторів  
 $H_0 = 4,1$  м;  $m_{\Gamma 0} = 2550$  кг;  $M.X_0 = 3$ ;

$\Delta H$ ,  $\Delta m_{\Gamma}$ ,  $\Delta M.X$  – інтервали варіювання факторів  
 $\Delta H = 3,9$  м;  $\Delta m_{\Gamma} = 2450$  кг;  $\Delta M.X = 2$ .

За допомогою отриманого рівняння регресії (20) можна розраховувати сумарні втрати енергії при підйомі вантажу мостовими кранами в/п 5 т, з високою для інженерних розрахунків точністю, при будь-яких значеннях факторів  $x_1(H)$ ,  $x_2(m_{\Gamma})$ ,  $x_3(M.X)$  у встановленій області їх визначення.

## Висновки

1. Розрахунки втрат енергії та динамічних навантажень підйомних кранів треба здійснювати за допомогою методики, яка враховує основні параметри сис-

теми “привід – металоконструкція – вантаж”, що підвищує точність розрахунків на 13–25 %.

2. Аналіз впливу різних факторів на втрати енергії при підйомі вантажу мостовими кранами показав, що втрати енергії значною мірою залежать від висоти підйому, маси вантажу та механічних характеристик. Сумарні втрати енергії змінюються пропорційно висоті, на яку піднімається вантаж. Залежність втрат енергії від маси вантажу має істотно нелінійний характер. Наприклад, при підйомі вантажу масою 5 т на висоту 8 м втрати енергії виявилися в 5,3 рази більше, ніж при підйомі того ж вантажу на висоту 2 м. Але при зменшенні маси вантажу, вплив висоти підйому на втрати енергії також знижується: при підйомі вантажу масою 1 т на висоту 8 м втрати енергії виявилися лише в 2,7 рази більшими, ніж при підйомі того ж вантажу на висоту 2 м.

3. Втрати енергії в основному залежать від моменту інерції ротора електродвигуна і муфт на швидкохідному валу. У меншій мірі вони залежать від маси вантажу (втрати енергії при підйомі номінального вантажу всього на 25 % більше ніж при підйомі порожнього гака). Тому для зниження енергоспоживання кранів та покращення умов обробки вантажів (за рахунок знижених швидкостей) доцільно встановлення додаткового мікроприводу.

3. Розроблена методика дозволяє не тільки точніше розраховувати динамічні навантаження та втрати енергії в електроприводах підйому кранів, але й вибрати найбільш економічні за енергоспоживанням і динамічними навантаженнями параметри кранових механізмів на стадії проектування.

## References

- [1] O. B. Nyezhtentsev, “Modeliuvannia vtrat enerhii mostovoykh kraniv pry pidiomi vantazhiv,” in Proc. III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Transport: nauka ta praktyka”, Kyiv – Odesa, 16 travnia 2024. Kyiv: SNU im. V. Dalia, 2024. pp. 74–79.
- [2] O. Nyezhtentsev, O. Kravchenko, J. Gerlici and A. Lovska, “Mathematical modeling energy losses and dynamic loads during operation of the crane lifting mechanism,” Elsevier B.V. Transportation Research Procedia, 74, pp. 791–798, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.563>
- [3] H. Tomasz, “Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation,” *J. Vibroeng*, No. 19, pp. 75–86, 2017, doi: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17310>.
- [4] O. Grigorov et al., “Analysis of Various Approaches to Modeling of Dynamics of Lifting-Transport Vehicles,” *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7. Iss. 4.3, pp. 64–70, 2018, doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19553>.
- [5] C. Niu and H. Ouyang, “Nonlinear Dynamic Analysis of Lifting Mechanism of an Electric Overhead Crane during Emergency Braking,” *Appl. Sci.*, No. 10, 8334, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10238334>.
- [6] O.B. Nyezhtentsev, “Dynamika mostovoho krana pry halmuvanni vantazhu, shcho pidnimaetsia,” in Proc. I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii “Intehratsiia osvity, nauky ta biznesu v suchasnomu seredovyshchi: zymovi dysputy,” 6–7 Feb. 2020. Vol. 2, pp. 458–462, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>.  
 C. M. Niu, H. W. Zhang, and H. Ouyang, “A comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 226, pp. 1484–1503, 2012, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>
- [7] R. Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*. 2nd. Elsevier, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102884-1.00001-7>.

- [8] A. Hughes and B. Drury, *Electric Motors and Drives*, 5th. Elsevier, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102615-1.00003-9>.
- [9] V. Subrahmanyam, *Electric Drives*, 2nd., McGraw Hill Education, 2017.
- [10] A. Veltman, ET. AL *Fundamentals of electrical drives: power systems* paperback. SPRINGER (SIE), 2012.
- [11] Yu. M. Lavrynenko et al., *Elektropryvod*, Yu. M. Lavrynenko Ed., Kyiv: Lira-K, 2009.
- [12] S. M. Avetisyan and A. B. Nezhentsev, "During the operation of the lifting mechanisms of goods. Pidjomno-transportna tekhnika," in *Software for the study of transient processes of load-lifting cranes*, Vol. 2, 1(9), pp. 83–95, 2004.
- [13] L. Ya. Budikov, *Mnogoparametricheskii analiz dinamiki gruzopodyomnikh kranov mostovogo tipa*, Lugansk: VNU im. V. Dalya, 2003.

## The method of calculation and research of dynamic loads and energy losses during the operation of the lifting mechanism of the overhead crane

O. Nyzhentsev<sup>1</sup> • O. Kravchenko<sup>2</sup> • H. Boiko<sup>3</sup> • I. Tsymbalenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

<sup>3</sup> Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** A characteristic feature of the details considered in the article is the increased diameter of the flange. At the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanical and Mechanical Engineering Institute of the Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky developed an original technological process for manufacturing products with a developed flange part using the positive effects of the progressive rolling stamping method. The method has energy-strength advantages over traditional methods of manufacturing parts with relatively thin structural elements. The center of application of such technologies is expanding more and more, but the basic technological calculations of process parameters have not yet been introduced widely enough into production practice. The proposed sequence of technological calculations and basic parameters of specialized installations for rolling stamping.

**Keywords:** orbital stamping, rolling stamping, energy-force parameters, technological process, work balance method, modeling, finite element method.