

## УТОЧНЕНИЙ ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МІНІМІЗАЦІЯ НАВАНТАЖЕНЬ У КАНАТАХ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ

Юрій Човнюк<sup>1</sup>, Михайло Діктерук<sup>2</sup>, Світлана Комоцька<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
вул. Героїв Оборони, 11, Київ, Україна, e-mail: ychovnyuk@ukr.net

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, e-mail: ychovnyuk@ukr.net

## REFINED DYNAMIC ANALYSIS AND MINIMIZATION OF STRESSES IN THE ROPES OF HOISTING CRANES

Yuriy Chovnyuk<sup>1</sup>, Mykhaylo Dykteruk<sup>2</sup>, Svetlana Komotskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Heroyiv Oborony st., 11, Kyiv, Ukraine, e-mail: ychovnyuk@ukr.net

<sup>2</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Povitroflotsky Prospect, 31, Kyiv, Ukraine, ychovnyuk@ukr.net

**АНОТАЦІЯ.** Наведений уточнений динамічний аналіз та оптимізація (мінімізація) навантажень у канатах вантажопідйомних кранів. Встановлені режими руху вантажу на канаті, за яких мінімізовані як коливання самого вантажу, так і пружні сили, котрі деформують канат. Як критерій якості руху обраний той, що мінімізує коефіцієнт динамічності.

**Ключові слова:** уточнення, динаміка, аналіз, мінімізація, оптимізація, навантаження, канат, вантажопідйомний кран.

**АННОТАЦИЯ.** Приведен уточненный динамический анализ и оптимизация (минимизация) нагрузок на канаты грузоподъемных кранов. Установлены режимы движения груза на канате, при которых минимизированы как колебания самого груза, так и упругие силы, которые деформируют канат. В качестве критерия качества движения выбран тот, который минимизирует коэффициент динамичности.

**Ключевые слова:** уточнения, динамика, анализ, минимизация, оптимизация, нагрузка, канат, грузоподъемный кран.

**ABSTRACT. Purpose.** The specified dynamic analysis and optimization (minimization) of rope's loads for loading cranes is proposed. The modes of motion of load on a rope are set, which minimize the vibrations of load and elastic forces, which deform a rope, as well. **Methodology/approach.** One may use as a criterion of quality of motion that, which minimizes the coefficient of dynamic quality. The methods of variation accounting are used. The damping effects of vibrations are neglected. **Research limitations/implications.** The two-mass model of load mechanism of cranes is used. The linear system of motion equations is investigated. **Originality/value.** The coefficient of dynamic quality is valued. One may see, that this coefficient is practically equal to idealized situation when mentioned above coefficient is one.

**Key words:** specification, dynamic, analysis, minimization, optimization, load, rope, loading crane.

### ВСТУП

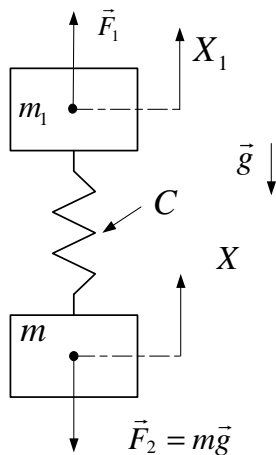
Відомо, що продуктивність й надійність вантажопідйомних кранів, точність виконання ними різноманітних операцій (розвантажувально-навантажувальних, транспортних, монтажних тощо) суттєвим чином залежить від динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) гнучких робочих органів, приводу, металоконструкцій. Зрозуміло, що величини таких навантажень залежать, перш за все, від ділянки руху вантажопідйомної машини чи її механізму. Найбільші динамічні навантаження

виникають на ділянках перехідних процесів (пуск, гальмування, реверсування руху). Під час гальмування у процесі спуску вантажу коефіцієнт динамічності у пружних елементах кранових механізмів досягає значної величини.

Одним із шляхів зменшення подібних навантажень є вибір необхідних (оптимальних) режимів руху приводних механізмів на різних ділянках перехідних процесів. Задля мінімізації динамічних навантажень на канат, наприклад, у процесах підйому вантажу, слід детально дослідити вплив різних режимів руху, визначаючи при цьому

для кожного з таких режимів коефіцієнт динамічності (і прагнучи одночасно його мінімізувати). Саме такий режим руху можна вважати оптимальним.

Для визначення динамічних навантажень у пружному елементі (канаті) в першому наближенні з достатнім ступенем точності може бути використана двомасова модель, схема якої показана на рис. 1. Дослідження різних авторів [1, 2] дозволяють обґрунтувати доволі високу точність подібної моделі, яка всього на 5...10% відрізняється від дійсних динамічних навантажень.



**Рис.1.** Динамічна модель механізму підйому вантажу «з ваги»

**Fig. 1.** Dynamic model of loading-up mechanism «on weight»

На схемі динамічної моделі механізму підйому вантажу (див. рис. 1) прийняті позначення роботи [3], а саме:  $m, m_1$  - зведені до підйомного канату маси вантажу і приводного механізму з барабаном відповідно;  $x, x_1$  - узагальнюючі координати мас  $m, m_1$  відповідно;  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$  - рушійна сила приводу і сили ваги вантажу відповідно, зведені до вантажного канату;  $C$  - жорсткість канату.

У роботі [4] розглянуті деякі можливі режими руху приводного механізму на ділянці пуску. Зокрема, запропоновані наступні режими: 1) режими руху з постійним прискоренням, який мінімізує величину рушійного моменту приводу; 2) режим руху з лінійною зміною прискорення, який мінімізує динамічну складову потужності

приводу; 3) режим руху зі зміною прискорення по кривій третього порядку; 4) режим руху зі зміною прискорення по кривій п'ятого порядку. Останні два режими руху дають плавну зміну прискорень приводного механізму, що забезпечує зменшення коливань й динамічних навантажень в пружних елементах.

Нижче буде показаний вплив цих режимів руху на характер зміни й максимальні значення динамічних навантажень в канаті при підйомі вантажу під час пуску.

На відміну від досліджень [3...7], будемо оптимальним вважати такий режим підйому вантажу «з ваги» («з підхватом»), коли коефіцієнт динамічності  $K_d$  приймає мінімальні значення протягом усього процесу підйому вантажу.

## МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає у обґрунтуванні режимів підйому вантажу вантажопідйомним краном «з ваги» чи «з підхватом», за яких мінімізуються динамічні навантаження у канатах і одночасно мінімальним є коефіцієнт динамічності  $K_d$  протягом усього процесу вказаного підйому.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Рівняння руху розглянутої моделі (див. рис.1) механізму підйому вантажу мають вигляд

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = F_1 - c \cdot (x_1 - x); \\ m \cdot \ddot{x} = c \cdot (x_1 - x) - F_2; F_2 = mg, \end{cases} \quad (1)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння.

У (1) рушійна сила приводу визначається залежністю

$$F_1 = F_2 + (m + m_1) \cdot a = mg + (m + m_1) \cdot a, \quad (2)$$

де  $a = a(t)$  - функція прискорення того чи іншого режиму руху приводного механізму,

яка залежить від часу  $t$  й визначена у [4].

Підйом вантажу «з ваги»

Коефіцієнт динамічності  $K_d$  при підйомі вантажу визначається формулою

$$K_d(t) = \frac{mg + m\ddot{x}}{mg} = \frac{c(x_1 - x)}{mg} = 1 + \frac{\ddot{x}}{g}. \quad (3)$$

Нехай тривалість розгону вантажу при його підйомі (по суті, це тривалість процесу пуску вантажопідйомного механізму) складає  $t = t_p$ . Оберемо як критерій такого руху наступний:

$$J = \int_0^{t_p} [K_d(t)]^2 dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Слід зазначити, що режим підйому вантажу, що задовольняє критерію якості руху (4), одночасно мінімізує й пружні навантаження у канаті, як це випливає з (3).

Систему рівнянь (1) легко звести до одного звичайного диференціального рівняння четвертого порядку для  $x(t)$ :

$$x^{(IV)} + k^2 \cdot \ddot{x} = k^2 \cdot a, \quad (5)$$

де:  $k = \sqrt{c \cdot \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{m_1} \right)}$  - частота власних коливань обраної динамічної моделі механізму підйому вантажу (т. з. двомасова модель).

З (5) легко визначити  $\ddot{x}$ :

$$\ddot{x} = \frac{k^2 \cdot a - x^{(IV)}}{k^2}. \quad (6)$$

Підставляючи (6) у (4), матимемо наступний критерій якості руху вантажу при його підйомі:

$$K_d(t) = 1 + \frac{1}{gk^2} \cdot (k^2 a - x^{(IV)}); \quad (7)$$

$$\int_0^{t_p} \left\{ 1 + \frac{a}{g} - \frac{x^{(IV)}}{gk^2} \right\}^2 dt \rightarrow \min.$$

Необхідна умова (7) відповідає рівнянню Ейлера-Пуассона вигляду:

$$x^{(VIII)} = k^2 \cdot a^{(IV)}. \quad (8)$$

Диференціальне рівняння (8) будемо розв'язувати за наступних початкових умов руху вантажу:

$$\begin{cases} t = 0 - x|_{t=0} = \dot{x}|_{t=0} = 0; \ddot{x}|_{t=0} = -g; \ddot{\ddot{x}}|_{t=0} = 0; \\ x^{(IV)}|_{t=0} = k^2 \cdot a(0) + k^2 \cdot g; \\ x^{(V)}|_{t=0} = k^2 \cdot \dot{a}(0); \\ x^{(VI)}|_{t=0} = k^2 \cdot \ddot{a}(0) - k^4 \cdot a(0) - k^4 \cdot g; \\ x^{(VII)}|_{t=0} = k^2 \cdot \ddot{\ddot{a}}(0) - k^4 \cdot \dot{a}(0). \end{cases} \quad (9)$$

Для першого, другого і третього режимів руху привідного механізму на ділянці пуску маємо

$$a^{(IV)} = 0 \Rightarrow x^{(VIII)} = 0. \quad (10)$$

Для четвертого режиму руху привідного механізму на ділянці пуску [4] маємо:

$$\begin{cases} a(t) = \frac{60v_y}{t_p} \left\{ \frac{t^2}{t_p^2} - 3 \frac{t^3}{t_p^3} + 3 \frac{t^4}{t_p^4} - \frac{t^5}{t_p^5} \right\}; \\ a^{(IV)}(t) = \frac{60v_y}{t_p} \cdot \left\{ \frac{72}{t_p^4} - \frac{120t}{t_p^5} \right\}. \end{cases} \quad (11)$$

У (9), (11)  $v_y$  - швидкість усталеного руху вантажу після закінчення перехідного процесу розгону тривалістю  $t_p$ .

Для (10), використовуючи умови (9), маємо

$$x(t) = -\frac{g}{2}t^2 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5 + \alpha_6 t^6 + \alpha_7 t^7, \quad (12)$$

де  $\alpha_4 = \{k^2 a(0) + k^2 g\} / 24$ ;  $\alpha_5 = k^2 \dot{a}(0) / 120$ ;

$\alpha_6 = \{k^2 \ddot{a}(0) - k^4 a(0) - k^4 g\} / 720$ ;

$\alpha_7 = \{k^2 \ddot{\ddot{a}}(0) - k^4 \dot{a}(0)\} / 5040$ .

Тоді для  $K_d(t)$  з (10), (12)

$$K_{д\min}(t) = 1 + \frac{a(t)}{g} - \frac{x^{(IV)}(t)}{gk^2} =$$

$$= 1 + \frac{a(t)}{g} - \frac{1}{gk^2} \left\{ \begin{array}{l} 24\alpha_4 + 120\alpha_5 t + \\ + 360\alpha_6 t^2 + 840\alpha_7 t^3 \end{array} \right\}, \quad (13)$$

$$t \in [0, t_p].$$

Формула (13) справедлива для режимів руху привідного механізму, які умовно позначені в [4] як перший, другий та третій.

Для розв'язку рівняння (8) при початкових умовах (9) і виразі для  $a^{(IV)}(t)$  з (11) у випадку четвертого режиму руху привідного механізму

$$x^{(VIII)} = k^2 \cdot \frac{60v_y}{t_p} \cdot \left\{ \frac{72}{t_p^4} - \frac{120t}{t_p^5} \right\} =$$

$$= \left[ \frac{4320v_y}{t_p^5} - \frac{7200v_y t}{t_p^6} \right] k^2. \quad (14)$$

Розв'язок (14) має наступний вигляд:

$$x(t) = x_{одн.}(t) + x_{част.}(t);$$

$$x_{одн.}(t) = \beta_2 t^2 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5 + \beta_6 t^6 + \beta_7 t^7; \quad (15)$$

$$x_{част.}(t) = \frac{4320v_y}{4!t_p^5} t^4 - \frac{7200v_y}{5!t_p^6} t^5,$$

де

$$\beta_2 = -\frac{g}{2}; \left( \beta_4 + \frac{4320v_y}{4!t_p^5} \right) = \frac{k^2 \{a(0) + g\}}{24};$$

$$\left( \beta_5 - \frac{7200v_y}{5!t_p^6} \right) = \frac{k^2 \dot{a}(0)}{120};$$

$$\beta_6 = k^2 \{ \ddot{a}(0) - k^2 a(0) - k^2 g \} / 720;$$

$$\beta_7 = \{ k^2 \ddot{\ddot{a}}(0) - k^4 \dot{a}(0) \} / 5040.$$

Нижченаведений вираз для  $K_{д}(t)$  відповідає розв'язку (15) рівняння (14).

Коефіцієнт динамічності  $K_{д}(t)$  має вигляд:

$$K_{д\min}(t) = 1 + \frac{a(t)}{g} - \frac{1}{gk^2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 24\beta_4 + 120\beta_5 t + 360\beta_6 t^2 + 840\beta_7 t^3 + \\ + \frac{4320v_y}{t_p^5} - \frac{7200v_y t}{t_p^6} \end{array} \right\}. \quad (16)$$

Для визначення  $a(0)$ ,  $\dot{a}(0)$ ,  $\ddot{a}(0)$ ,  $\ddot{\ddot{a}}(0)$  для кожного з чотирьох [4] вищевказаних режимів руху привідного механізму маємо:

а) *перший режим*

$$a(t) = \frac{v_y}{t_p} = \text{const}; a(0) = \frac{v_y}{t_p};$$

$$\dot{a}(0) = \ddot{a}(0) = \ddot{\ddot{a}}(0) = 0; \quad (17)$$

б) *другий режим* –

$$a(t) = \frac{2v_y}{t_p} \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_p} \right); a(0) = \frac{2v_y}{t_p};$$

$$\dot{a}(0) = -\frac{2v_y}{t_p^2}; \ddot{a}(0) = \ddot{\ddot{a}}(0) = 0; \quad (18)$$

в) *третій режим* –

$$a(t) = \frac{12v_y}{t_p} \cdot \left( \frac{t}{t_p} - 2\frac{t^2}{t_p^2} + \frac{t^3}{t_p^3} \right);$$

$$a(0) = 0; \dot{a}(0) = \frac{12v_y}{t_p^2}; \quad (19)$$

$$\ddot{a}(0) = -\frac{24 \cdot 2 \cdot v_y}{t_p^3}; \ddot{\ddot{a}}(0) = \frac{72v_y}{t_p^4};$$

г) *четвертий режим* –

$$a(t) = \frac{60v_y}{t_p^3} \left( t^2 - 3\frac{t^3}{t_p} + 3\frac{t^4}{t_p^2} - \frac{t^5}{t_p^3} \right);$$

$$a(0) = 0; \dot{a}(0) = 0; \ddot{a}(0) = \frac{120v_y}{t_p^3}; \quad (20)$$

$$\ddot{\ddot{a}}(0) = -\frac{1080v_y}{t_p^4}.$$

Якщо використати співвідношення (3) та критерій (4) й не здійснювати заміну (6), але все одно використовувати методи варіаційного числення, то можна показати наступне:

$$\int_0^{t_p} \left(1 + \frac{\ddot{x}}{g}\right)^2 dt \Rightarrow \min; \Leftrightarrow x^{(IV)} = 0; \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x^{(IV)} + k^2 \ddot{x} = k^2 a; \\ x^{(IV)} = 0; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \ddot{x} = a(t); \\ x^{(IV)} = 0; \end{cases} \quad (21)$$

$$\Leftrightarrow x^{(IV)} = \ddot{a}(t) \equiv 0 \Leftrightarrow \ddot{a} = 0.$$

Отже, мінімум для  $K_d(t)$  забезпечують тільки перший та другий режими руху привідного механізму, оскільки для третього й четвертого режимів  $\ddot{a} \neq 0$ . При цьому

$$K_d(t) = 1 + \frac{a(t)}{g} =$$

$$= \begin{cases} 1 + \frac{v_y}{gt_p}, a = \frac{v_y}{t_p} = const; \\ 1 + \frac{2v_y}{gt_p} \left(1 - \frac{t}{t_p}\right), a = \frac{2v_y}{t_p} \left(1 - \frac{t}{t_p}\right). \end{cases} \quad (22)$$

*Підйом вантажу «з ваги»*

Підйом вантажу «з ваги» після вибору слабину канату (підйом «з підхватом» при напруженому стані канату).

Введемо нову змінну:  $S = x_1 - x$  (і, відповідно,  $\ddot{S} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}$ ). Тоді (1), (2) можна звести до рівняння

$$\ddot{S} + k^2 \cdot S = \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot [a(t) + g]. \quad (23)$$

Початкові умови на цій стадії підйому вантажу «з підхватом» мають вигляд

$$t = 0; S = 0; \dot{S} = v_y. \quad (24)$$

Тоді коефіцієнт динамічності

$$K_d(t) = \frac{cS + mg}{mg} = 1 + \frac{cS}{mg}. \quad (25)$$

З (23)  $S$  можна подати через  $\ddot{S}$  та  $a(t)$ :

$$S = \left\{ \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot [a(t) + g] - \ddot{S} \right\} \cdot \frac{1}{k^2}. \quad (26)$$

Враховуючи (26), співвідношення (25) можна подати наступним чином:

$$K_d(t) = 1 + \frac{c}{mgk^2} \cdot \left\{ \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot [a(t) + g] - \ddot{S} \right\}. \quad (27)$$

Необхідною умовою реалізації якості руху згідно критерію (4) є рівняння Ейлера-Пуассона вигляду

$$S^{(IV)} = \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot \ddot{a}(t). \quad (28)$$

Для знаходження закону  $S(t)$  необхідно умови (24) доповнити наступними:

$$t = 0; \ddot{S} = \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot [a(0) + g];$$

$$\ddot{S} = -k^2 \cdot v_y + \frac{(m + m_1)}{m_1} \cdot \dot{a}(0). \quad (29)$$

Для першого та другого режимів руху привідного механізму  $\ddot{a}(t) \equiv 0$ . Тому закон  $S(t)$  із врахуванням початкових умов (24), (29) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} S(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3; b_0 = 0; b_1 = v_y; \\ b_2 = \frac{(m + m_1)}{2m_1} [a(0) + g]; \\ b_3 = \frac{1}{6} \left\{ -k^2 v_y + \frac{(m_1 + m)}{m_1} \cdot \dot{a}(0) \right\}. \end{cases} \quad (30)$$

Значення  $a(0), \dot{a}(0)$  для першого та другого режимів наведені вище (співвідношення (17), (18)).

Для третього режиму руху привідного механізму

$$\ddot{a}(t) = \frac{12v_y}{t_p} \left[ -\frac{4}{t_p^2} + \frac{6t}{t_p^3} \right]. \quad (31)$$

Тому для закону  $S(t)$  маємо

$$S(t) = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3 + E_1 \cdot t^4 + E_2 \cdot t^5, \quad (32)$$

де

$$d_0 = 0; d_1 = v_y; d_2 = \frac{(m+m_1)}{2m_1} [a(0) + g];$$

$$d_3 = \frac{1}{6} \left\{ -k^2 v_y + \frac{(m_1+m)}{m_1} \cdot \dot{a}(0) \right\};$$

$$E_1 = \frac{(-4)(m+m_1)v_y}{m_1 t_p^3};$$

$$E_2 = \frac{(m+m_1) \cdot 12 \cdot v_y \cdot 6}{m_1 \cdot t_p^4 \cdot 5!} = \frac{(m+m_1) \cdot 72 \cdot v_y}{m_1 \cdot 5! \cdot t_p^4}.$$

Вирази  $a(0), \dot{a}(0)$  для цього режиму руху привідного механізму наведені у (19).

Для четвертого режиму руху привідного механізму

$$\ddot{a}(t) = \frac{60v_y}{t_p^3} \left( 2 - 18 \frac{t}{t_p} + 36 \frac{t^2}{t_p^2} - 20 \frac{t^3}{t_p^3} \right). \quad (33)$$

Для цього випадку для  $S(t)$  маємо

$$S(t) = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + e_3 t^3 + F_1 t^4 + F_2 t^5 + F_3 t^6 + F_4 t^7, \quad (34)$$

де

$$e_0 = 0; e_1 = v_y; e_2 = \frac{(m+m_1)}{2m_1} [a(0) + g];$$

$$e_3 = \frac{1}{6} \left\{ -k^2 v_y + \frac{(m_1+m)}{m_1} \cdot \dot{a}(0) \right\};$$

$$F_1 = \frac{120v_y (m+m_1)}{t_p^3 \cdot 4! \cdot m_1}; F_2 = \frac{(-1080)v_y (m+m_1)}{t_p^4 \cdot 5! \cdot m_1};$$

$$F_3 = \frac{(2160)v_y (m+m_1) 2}{t_p^5 \cdot 6! \cdot m_1};$$

$$F_4 = \frac{(1200)v_y (m+m_1) 6}{t_p^6 \cdot 7! \cdot m_1}.$$

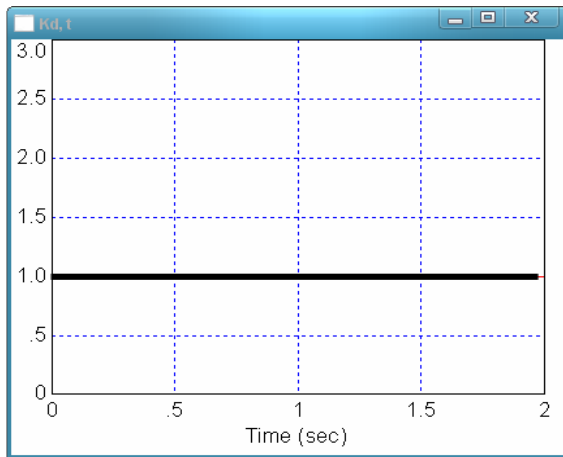
Вирази  $a(0), \dot{a}(0)$  для цього режиму руху привідного механізму наведені у (20).

Тепер, знаючи для кожного з чотирьох режимів руху привідного механізму закон  $S(t)$  руху системи підйому вантажу «з підхватом» (для стадії напруженого стану канату), можна визначити  $K_d(t)$  (27). У зв'язку з громіздкістю тут ці співвідношення не наведені. Аналогічно можна для цієї мети використати співвідношення (25).

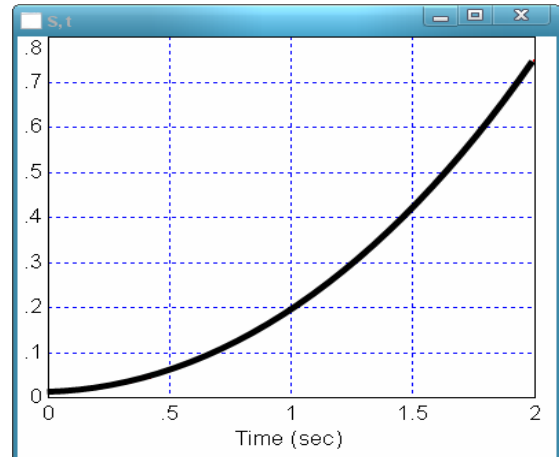
На рис. 2-7 наведені результати чисельних розрахунків на ПЕОМ залежностей  $K_d(t)$  й  $S(t)$  для різних режимів руху привідного пристрою механізму підйому вантажу крана.

## ВИСНОВКИ

1. Проведений уточнений динамічний аналіз та мінімізовані навантаження у канатах вантажопідйомних кранів. Встановлені режими руху вантажу  $S(t)$  на канаті, за яких мінімізовані як коливання самого вантажу, так і пружні сили, котрі деформують канат.
2. Розраховані залежності  $K_d(t)$  динамічного коефіцієнту для різних режимів руху привідного механізму підйому вантажу при використанні двох способів підйому: а) «з ваги»; б) «з підхватом».
3. Встановлені у роботі залежності можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажу кранів як на стадіях їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації з використанням сучасних мехатронних систем керування їх рухом.



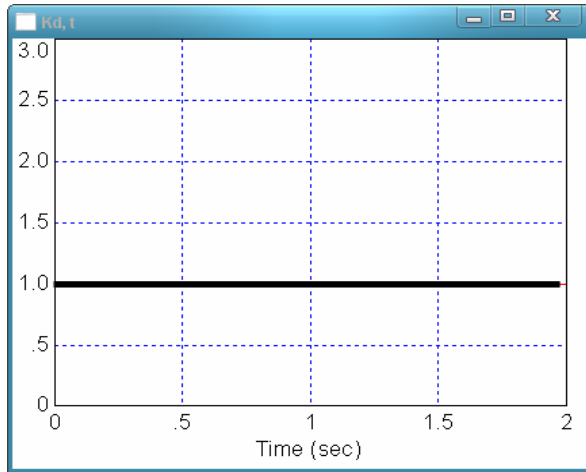
$a(a)$



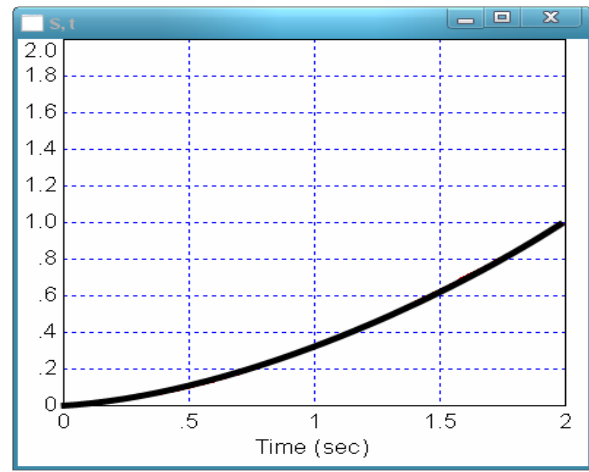
$b(b)$

**Рис. 2.** Підйом вантажу «з ваги», перший режим руху привідного механізму:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$

**Fig. 2.** Getting up of load "from weight", first mode of motion of drive mechanism:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$



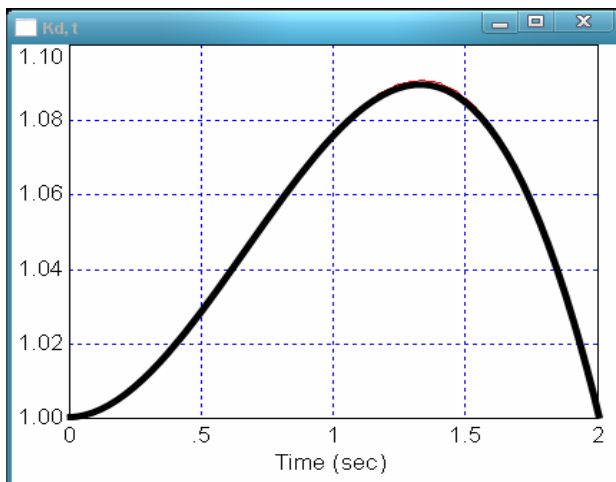
$a(a)$



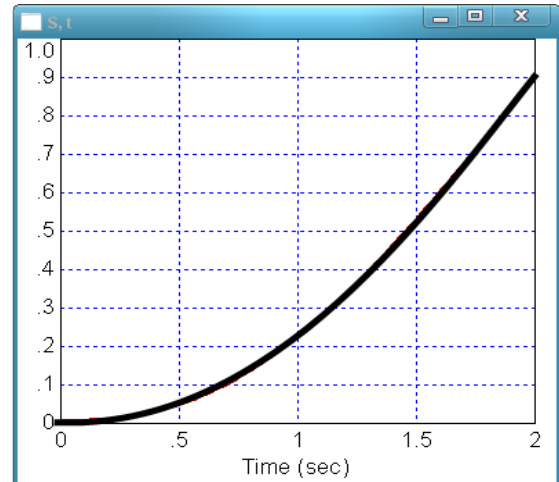
$b(b)$

**Рис. 3.** Підйом вантажу «з ваги», другий режим руху привідного механізму:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$

**Fig. 3.** Getting up of load "from weight", second mode of motion of drive mechanism:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$



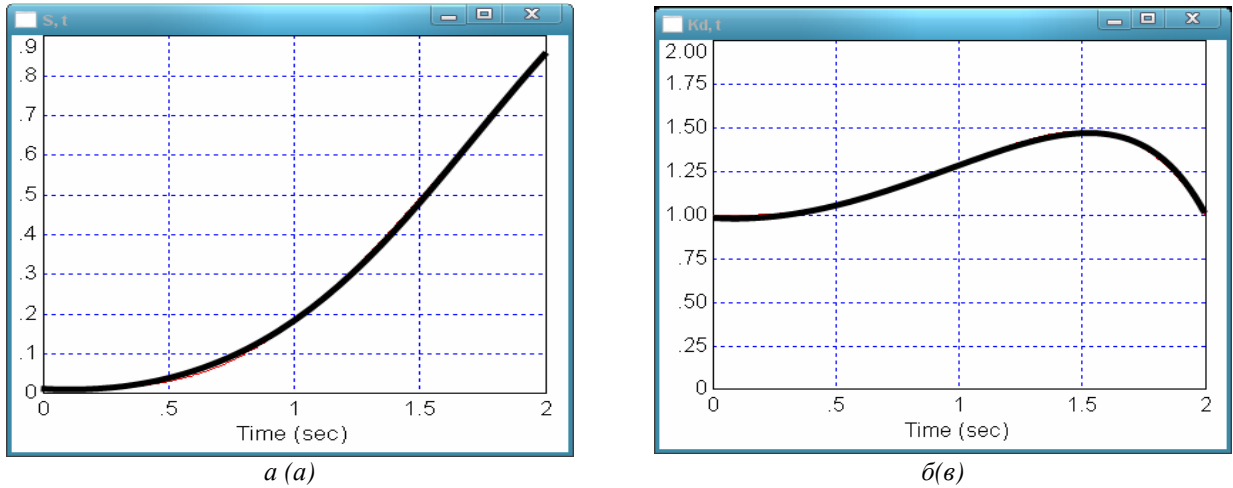
$a(a)$



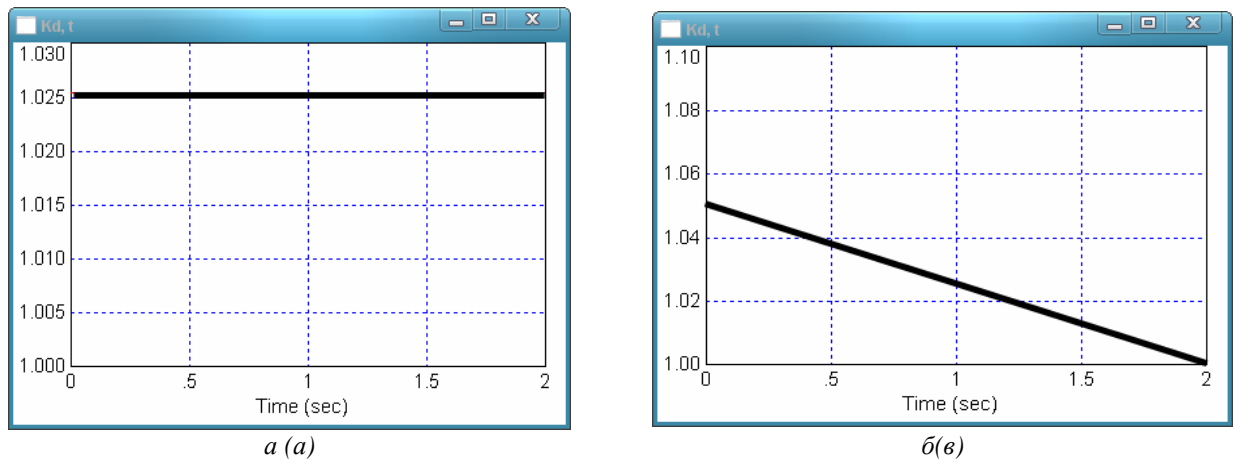
$b(b)$

**Рис. 4.** Підйом вантажу «з ваги», третій режим руху привідного механізму:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$

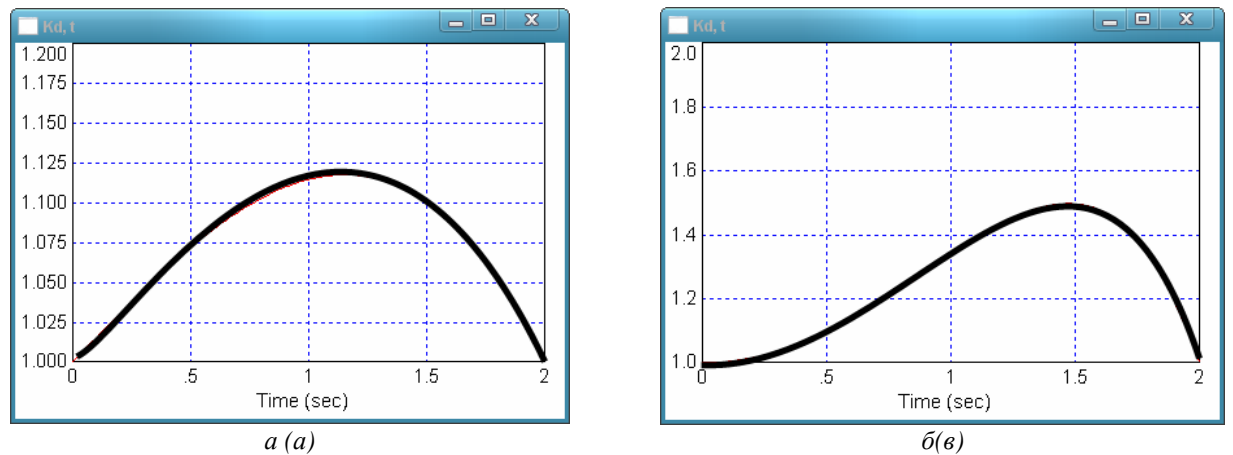
**Fig. 4.** Getting up of load "from weight", third mode of motion of drive mechanism:  $a - K_d(t)$  ;  $b - S(t)$



**Рис. 5.** Підйом вантажу «з ваги», четвертий режим руху привідного механізму:  $a - K_d(t)$ ;  $\bar{b} - S(t)$   
**Fig. 5.** Getting up of load "from weight", fourth mode of motion of drive mechanism:  $a - K_d(t)$ ;  $\bar{b} - S(t)$



**Рис. 6.** Підйом вантажу «з підхватом», залежність  $K_d(t)$ :  $a$  – перший режим;  $\bar{b}$  – другий режим  
**Fig. 6.** Getting up of load "with picking-up", dependence  $K_d(t)$ :  $a$  – the first mode;  $\bar{b}$  – the second mode



**Рис. 7.** Підйом вантажу «з підхватом», залежність  $K_d(t)$ :  $a$  – третій режим;  $\bar{b}$  – четвертий режим  
**Fig. 7.** Getting up of load "with picking-up", dependence  $K_d(t)$ :  $a$  – the third mode;  $\bar{b}$  – the fourth mode



## ЛІТЕРАТУРА

1. Волков Д. П. Динамические нагрузки в универсальных экскаваторах-кранах / Д. П. Волков. – М.: Mashgiz, 1958. – 269 с.
2. Кожевников С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – К.: Наукова думка, 1986. – 288 с.
3. Ловейкін В.С. Мінімізація динамічних навантажень в пружних елементах вантажопідйомних машин / В.С. Ловейкін // Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. – Київ, 1998. – Вип. 52. – С. 63-68.
4. Ловейкін В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин. – К.: УМК ВО, 1990. – 166 с.
5. Ловейкін В. Синтез оптимального керування рухом вантажопідйомними кранами / В. Ловейкін, Ю. Ромасевич // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2014. – №83. – С. 26-33.
6. Ловейкін В.С., Паламарчук Д.А., Іщук В.В. Експериментальне дослідження руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана при зміні вильоту вантажу // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2011. – №77. – С. 38-43.
7. Ловейкін В.С., Міщук Д.О. Експериментальне дослідження динаміки руху штока гідроциліндра підйому шарнірно-зчленованої стрілової системи крана-маніпулятора з гідроприводом // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2011. – №78. – С. 20-27.
- transients in machines]. Kyiv, Naukova dumka, 288.
3. Lovejkin V.S., 1998. Minimizacionija dinamicnih navantazhen' v pruzhnih elementah vantazhopidjomnih mashin [Minimization of the dynamic loading in the resilient elements of load-lifting machines]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni i meliorativni mashyny. [Mining, constructional, road and melioration machines], No. 52, 63-68.
4. Lovejkin V.S., 1990. Raschety optimal'nyh rezhimov dvizhenija mehanizmov stroitel'nyh mashin [Calculations of the optimal modes of motion of mechanisms of building machines]. Kyiv. UMK VO, 166.
5. Loveykin V. Romasevych Yu., 2014. Sintez optimal'nogo keruvannja ruhom vantazhopidjomnimi kranami [Synthesis of optimal control movement of cranes]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and agricultural machines], No.83, 26-33. – (in Ukrainian).
6. Loveykin V.S., Palamarchuk D.A., Ishchuk V.V., 2011. Eksperymentalne doslidzhennya rukhu sharnirno-zchlenovanoi strilovoyi systemy kрана pry zmini vylotu vantazhu. [Experimental study of motion hinge-articulated jib crane system when changing cargo flight]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No.77, 38-43. – (in Ukrainian).
7. Loveykin V.S., Mishchuk D.O., 2011 Eksperymentalne doslidzhennya dynamiky rukhu shtoka hidrotsylindra pidyomu sharnirno-zchlenovanoi strilovoyi systemy kranamanipulyatora z hidropyvodom [Experimental study of the dynamics of movement rod cylinder lifting hinge-jointed boom system mounted crane with hydraulic drive] Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], No. 78, 20-27. – (in Ukrainian).

## REFERENCES

1. Volkov D. P., 1958. Dinamicheskie nagruzki v universal'nyh jekskavatorah-kranah [The dynamic loading in universal power-shovels-faucets]. Moscow, Mashgiz, 269.
2. Kozhevnikov S. N., 1986. Dinamika nestacionarnykh processov v mashinah [A dynamics of