

УДК 621.01

ФУНДАМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ (МІНІМІЗАЦІЯ) ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КРАНІВ

Частина I

Човнюк Ю. В.¹, Приймаченко О. В.¹, Чередніченко П. П.¹,
Турчанінова Л. І.¹, Шудра Н. С.¹

¹Київський Національний університет будівництва та архітектури

Анотація. Проведений фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) механізмів підйому вантажу кранів, які використовуються у містобудуванні. Основою аналізу та методики оптимізації режимів руху вказаних механізмів є підхід, який реалізований у класичному варіаційному численні, а саме: мінімізується інтегральний функціонал, котрий відображає небажані властивості механічної системи. Оптимізовані режими руху механізму підйому вантажу крану, який представлений у роботі механічною системою з лінійною функцією положення її елементів (вантаж на канаті й привідний механізм). Показаний суттєвий вплив режимів руху саме привідних механізмів на динамічні навантаження в пружних елементах (канатах) механізму підйому вантажу містобудівельного крану. Зазвичай окремі типові режими руху оптимізують тільки одну певну властивість вказаного механізму. У багатьох практичних випадках потрібно обрати режими руху, які оптимізують комплекс властивостей машини чи механізму (відповідно, крану або механізму підйому вантажу містобудівельного крану). Саме для вибору таких режимів руху машин і механізмів потрібні динамічні критерії їхньої оцінки. Усі існуючі критерії оцінки машин і механізмів умовно можна розділити на два класи: 1) позиційні (максимальні значення кінематичних характеристик ланок, динамічних навантажень, амплітуд і частот коливань, коефіцієнтів динамічності тощо); 2) інтегральні (середньоквадратичні за час руху значення кінематичних характеристик ланок і динамічних навантажень, енергетичні витрати і тому подібне). У роботі проведений фундаментальний аналіз вказаних критеріїв і показано, що для оцінки режимів руху вантажопідйомних машин, як і механізмів підйому вантажу кранів (стрілових, мостових, козлових, містобудівельних) необхідно використовувати інтегральні критерії, оскільки саме вони оцінюють рух протягом усього циклу. Наведені інтегральні критерії оцінки містобудівельних кранів і механізмів підйому вантажу, які у повній мірі відображають їхні динамічні властивості, характеристики руху і, зокрема, мінімізують динамічні навантаження на пружні елементи (канати).

Отримані у даному дослідженні результати можуть бути у подальшому використанні для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку вантажопідйомних кранів, котрі використовуються у містобудуванні, а також їх механізмів підйому вантажу, як на стадіях проектування, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: фундаментальний аналіз, оптимізація, динамічні навантаження, пружні елементи, механізми підйому вантажу, містобудівельні крани, режими руху, динамічні критерії.

FUNDAMENTAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION (MINIMIZATION) OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF CRANES LOAD LIFTING MECHANISMS

Part I

**Yu. Chovniuk¹, O. Priymachenko¹, P. Cherednichenko¹, L. Turchaninova¹,
N. Shudra¹**

¹ *Kyiv National University of Construction and Architecture*

Annotation. The fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements (ropes) of load lifting mechanisms of cranes used in urban development is carried out. The basis of the analysis and methodology of optimization of motion modes of the mentioned mechanisms is the approach implemented in the classical calculus of variations, namely: the integral functional is minimized, which reflects undesirable properties of the mechanical system. Optimized modes of motion of the crane load lifting mechanism, which is represented in the paper by a mechanical system with a linear function of the position of its elements (the load on the rope and the drive mechanism). The significant influence of motion modes of exactly drive mechanisms on dynamic loads in elastic elements (ropes) of the load lifting mechanism of a city-building crane is shown. Usually separate typical modes of motion optimize only one certain property of the specified mechanism. In many practical cases, it is necessary to select modes of motion that optimize a set of properties of a machine or mechanism (respectively, a crane or a load lifting mechanism of a city-building crane). It is for the selection of such modes of motion of machines and mechanisms that dynamic criteria for their evaluation are needed. All existing criteria for evaluating machines and mechanisms can be conditionally divided into two classes: 1) positional (maximum values of kinematic characteristics of links, dynamic loads, amplitudes and frequencies of oscillations, dynamics coefficients, etc.); 2) integral (rms values of kinematic characteristics of links and dynamic loads, energy costs, etc.). In the work the fundamental analysis of the mentioned criteria is carried out and it is shown that for estimation of motion modes of hoisting machines, as well as mechanisms of cargo lifting cranes (boom, bridge, gantry, city cranes) it is necessary to use integral criteria, because they are the ones that estimate motion during the whole cycle. Integral criteria for evaluating urban construction cranes and load lifting mechanisms are presented, which fully reflect their dynamic properties, motion characteristics and, in particular, minimize dynamic loads on elastic elements (ropes).

The results obtained in this study can be further used to clarify and improve the existing engineering methods of calculation of hoisting cranes used in urban planning, as well as their load lifting mechanisms, both at the design stages and in the modes of proper operation.

Keywords: fundamental analysis, optimization, dynamic loads, elastic elements, load lifting mechanisms, urban cranes, motion modes, dynamic criter.

1 ВСТУП

Відомо [1], що характер руху основних ланок механізмів підйому вантажу містобудівельних кранів, як і інших вантажопідйомних машин суттєво впливає на якість виконання технологічних процесів власне машиною, її продуктивність, надійність, довговічність тощо.

Режим руху кожної ланки механізму підйому вантажу, у свою чергу, визначається законом зміни у часі або положенні кінематичних характеристик (переміщень, швидкостей і так далі) і часом руху механічної системи. Для певної конкретної конструкції механізму підйому вантажу крану закон руху окремої ланки (наприклад, приводу) визначає закон руху інших ланок. Зауважимо, що повний час руху механізму підйому вантажу містобудівельного крану (як механізму циклічної дії) – це проміжок часу від моменту початку руху до його кінця.

При проектуванні вантажопідйомних машин (зокрема, кранів різної конструкції) й вантажопідйомних механізмів зазвичай використовуються різні типові режими руху: 1) зі сталою швидкістю; 2) зі сталим пришвидшенням; 3) зі змінним у часі пришвидшенням за лінійним, косинусоїдальним, синусоїдальним, поліноміальним та іншими законами [2]. Кожний з цих режимів руху оптимізує ті чи інші властивості механізмів з лінійною функцією положення провідної ланки відносно веденої. Слід також зазначити, що окремі типові режими руху оптимізують лише одну конкретну властивість механізму підйому вантажу містобудівельного крану.

Для вибору режимів руху подібних механізмів і машин необхідні узагальнені критерії оцінки їхньої ефективної роботи. Існують критерії оцінки вантажопідйомних машин і механізмів, які умовно можна розділити на два класи [1-3]: 1) позиційні (максимальні значення кінематичних характеристик ланок, динамічних навантажень, амплітуд і частот коливань, коефіцієнтів динамічності тощо); 2) інтегральні (середньоквадратичні за час руху значення кінематичних характеристик ланок і динамічних навантажень, енергетичні витрати і тому подібне). Фундаментальний аналіз цих критеріїв показує, що для оцінки режимів руху вантажопідйомних машин і механізмів слід використовувати саме інтегральні критерії, оскільки вони більш адекватно оцінюють рух механічних систем подібної структури й функціонального призначення протягом усього циклу (як і при перехідних процесах типу: розгін, гальмування, реверсування). Проте існуючі інтегральні критерії оцінки роботи вантажопідйомних машин і механізмів, на думку авторів даного дослідження, у неповній мірі відображають їхні динамічні властивості, характеристики руху, відсутні фізичні причини появи руху у механічній системі (при розгляді перехідних процесів), а початкові та кінцеві умови (термінальні умови), які необхідно виконати при моделюванні таких систем носять відсторонений, фізично ніяким чином не обґрунтований характер і вид. Тому виникає нагальна потреба у розробці нових динамічних критеріїв та фундаментальному аналізі режимів роботи (та їх оптимізації з точки зору мінімізації навантажень на пружні елементи (канати) вантажопідйомних механізмів містобудівельних кранів) з урахуванням науково обґрунтованих умов руху, які б задовольняли існуючим законам механіки (зокрема, першому та другому закону І. Ньютона).

Зміст даного дослідження і зводиться до вирішення окреслених вище проблем.

Слід зазначити, що режими руху механізмів вантажопідйомних кранів – це, по суті, функціональні залежності переміщень, швидкостей, пришвидшень тощо, ланок механізму від просторового і часового аргументів протягом усього циклу руху, а сам критерій оптимальності має вигляд інтегрального функціонала. Умова, за якої процедура порівняння допустимих режимів руху можлива, зводиться до того, що

вказаний критерій повинен виражатись скалярною величиною, а також для кожного режиму руху механічної системи набувати конкретного числового значення. Якщо залежності режимів руху вантажопідйомних механізмів містобудівельних кранів можуть набувати як додатних так і від'ємних значень, тоді у вирази підінтегральних функцій вони мають входити у квадратичному вигляді й відображати інерційні властивості конкретних ланок. Зокрема, підінтегральні функції критеріїв повинні включати всі силові фактори, діючі у механічній системі (інерційні, сили опору, ваги, пружні сили тощо), оскільки вони діють на елементи вантажопідйомного механізму й, у свою чергу, залежать від режимів руху.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботах [1-3] була представлена методика оптимізації режимів руху машин і вантажопідйомних механізмів кранів різних конструкцій та типів, яка базується на мінімізації інтегральних функціоналів, котрі відображають небажані властивості подібних механічних систем. Автори цитованих робіт оптимізували режими руху конкретних механічних систем, зокрема, з лінійною функцією положення елементів (механізмів вантажопідйомних машин) й показали, що існує суттєвий вплив режимів руху привідних механізмів на динамічні навантаження у пружних елементах (канатах) механізму підйому вантажу. У подальшому, автори [4-10] досліджень розробили методику оптимізації режимів руху вантажопідйомних механізмів (мостових, козлових, стрілових та інших) кранів. Проте у названих роботах, як і у [1-3], необґрунтовані фізичні причини виникнення руху у таких системах, а термінальні умови, тут введені, не є адекватними реальній ситуації, що виникає. Тому необхідно переглянути, доповнити ці умови й розробити нові динамічні критерії для подібних систем, які функціонують у реальних умовах експлуатації.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає у обґрунтуванні методу аналізу та оптимізації (мінімізації) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів, які використовуються у містобудуванні.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо вплив режиму пуску на динамічні навантаження, які виникають у одному з пружних елементів механізму підйому, наприклад, канаті. Для цього у першому наближенні використаємо двомасову динамічну модель механізму підйому крана (рис.1). На цьому рисунку прийняті такі позначення: m , m_1 – зведені до підйомного каната маси відповідно вантажу і приводного механізму з барабаном; X , X_1 – узагальнені координати відповідно мас m і m_1 ; F_1 та F_2 – рушійна сила приводу і вага вантажу, зведені до вантажного каната; C – жорсткість каната.

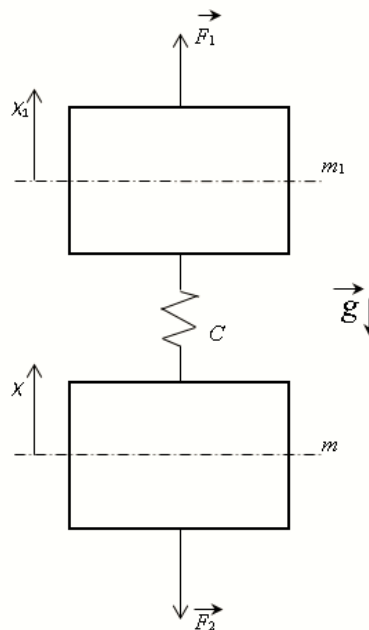


Рис. 1. Двомасова динамічна модель механізму підйому крана

Рівняння руху розглянутої системи (моделі механізму підйому вантажу містобудівельним краном) мають вигляд:

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

Подамо систему диференціальних рівнянь (1) у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{F_1}{m_1} - \frac{C}{m_1} \cdot (x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{C}{m} \cdot (x_1 - x) - \frac{F_2}{m}. \end{cases} \quad (2)$$

Віднімемо від першого рівняння системи (2) друге диференціальне рівняння цієї системи і введемо заміну змінних:

$$x_1 - x = \xi. \quad (3)$$

Тоді матимемо:

$$\ddot{\xi} + k^2 \cdot \xi = \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m}, \quad k^2 = C \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m} \right). \quad (4)$$

На відміну від підходу роботи [1] у подальшому для ξ аналізуватимемо рівняння другого порядку (похідні по часу t фігурують у (4) лише другого порядку). При $(F_1, F_2) = const$, рівняння (4) має наступний розв'язок:

$$\xi(t) = C_1 \cdot \sin kt + C_2 \cdot \cos kt + \frac{1}{k^2} \cdot \left\{ \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right\}. \quad (5)$$

Оскільки у початковий момент часу ($t = 0$) маємо:

$$x_1|_{t=0} = x|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1|_{t=0} = \dot{x}|_{t=0} = 0 \Leftrightarrow \xi|_{t=0} = \dot{\xi}|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

За таких початкових умов (6) для розв'язку (5) легко визначити константи C_1 та C_2 :

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\frac{1}{k^2} \cdot \left\{ \frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right\}. \quad (7)$$

Тоді розв'язок (5) набуває вигляду:

$$\xi(t) = \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot (1 - \cos kt) = \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (8)$$

При цьому, пружна сила, яка виникає у канаті в процесі пуску механізму підйому вантажу містобудівного крана приймає наступний вид:

$$F_{np.} = C \cdot \xi(t) = \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (9)$$

З урахуванням значення k^2 з (4) маємо:

$$F_{np.} = \frac{2}{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m} \right)} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \sin^2 \left(\frac{kt}{2} \right). \quad (10)$$

Максимального значення $F_{np.}(t)$ набуває у момент часу:

$$\frac{k \cdot t_n}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot (2n - 1), \quad n \in N, \Leftrightarrow t_n = \frac{\pi}{k} \cdot (2n - 1), \quad n \in N. \quad (11)$$

При цьому:

$$F_{np.}^{(max)} = F_{np.}(t)|_{t=t_n} = 2 \cdot \left(\frac{F_1 \cdot m}{m + m_1} + \frac{F_2 \cdot m_1}{m + m_1} \right). \quad (12)$$

Подібні до (12) перевантаження канатної системи містобудівного крана можуть привести до її руйнування і, у подальшому, навіть до аварії.

З'ясуємо, яким повинен бути закон руху даної системи ($\xi(t)$), за якого за термін часу $t \in (0; \tau_{II})$, де τ_{II} – тривалість у часі пуску механізму підйому вантажу, $F_{np.}(t)$ набуло б мінімальних значень, що і дозволяє уникнути аварійних ситуацій у канатній системі.

Для цього шуканий закон руху ($\xi(t)$) системи повинен задовольняти наступному критерію якості такого руху:

$$I = \int_0^{\tau_{II}} (C \cdot \xi)^2 dt \Rightarrow \min. \quad (13)$$

З рівняння (4) маємо:

$$C \cdot \xi = \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) - \frac{C \cdot \ddot{\xi}}{k^2}. \quad (14)$$

Тоді критерій якості руху системи зведеться до наступного (замість (13)):

$$I = \int_0^{\tau_{II}} \left\{ \frac{C}{k^2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) - \frac{C \cdot \ddot{\xi}}{k^2} \right\} dt \Rightarrow \min. \quad (15)$$

$$I = \left\{ \frac{1}{\tau_{II}} \cdot \int_0^{\tau_{II}} \left[c \cdot \left(\frac{P-W}{m_1} - \ddot{\xi} \right) \cdot \frac{1}{\Omega^2} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min.$$

Для того, щоб виконувався критерій (15) необхідно задовольнити умову Ейлера-Пуассона, яка зводиться у даному випадку до рівняння:

$$\xi^{(IV)} = 0. \quad (16)$$

Будемо розшукувати розв'язок (16) у формі сплайна по t третього порядку:

$$\xi(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3, \quad (17)$$

Невизначені константи A_0, A_1, A_2, A_3 знайдемо із наступних початкових умов:

Четверта початкова умова повинна визначити фінальні (кінцеві) кінематичні параметри системи. Згідно першого закону механіки І. Ньютона маємо:

$$\ddot{\xi}|_{t=\tau_{II}} = 0; \Leftrightarrow \dot{\xi}|_{t=\tau_{II}} = V_C; \Leftrightarrow \xi|_{t=\tau_{II}} = \frac{F_2}{C}. \quad (19)$$

Використовуючи останню форму четвертої початкової (термінальної) умови (19) маємо:

$$A_0 = 0; \quad A_1 = 0; \quad A_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right); \quad A_3 = \frac{\left\{ \frac{F_2}{C} - A_2 \cdot \tau_{II}^2 \right\}}{\tau_{II}^3}. \quad (20)$$

Остаточно, для закону руху системи підйому вантажу містобудівного крана, за якою виконується критерій якості руху (13), (15), маємо:

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot t^2 + \left\{ \frac{F_2}{C} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \tau_{II}^2 \right\} \cdot \frac{t^3}{\tau_{II}^3}. \quad (21)$$

При цьому оптимальне значення $F_{np.}(t)$ має вигляд:

$$\{F_{np.}(t)\}_{opt.} = \frac{C}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(t^2 - \frac{t^3}{\tau_{II}} \right) + F_2 \cdot \frac{t^3}{\tau_{II}^3}. \quad (22)$$

З виразу (22) чітко видно, що: $t = 0, \{F_{np.}(t)\}_{opt.} = 0$; при $t = \tau_{II}, \{F_{np.}(t)\}_{opt.} = F_2$. Ніяких різких змін амплітуди $F_{np.}(t)$ немає, як і коливань у канатній системі (рис.2).

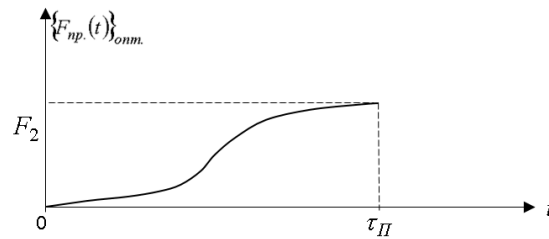


Рис.2. Залежність $\{F_{np.}(t)\}_{onn.}$

З другого рівняння системи (1) маємо:

$$\ddot{x} = \frac{C}{m} \cdot \xi(t) - \frac{F_2}{m}. \quad (23)$$

Використовуючи вираз для $\xi(t)$ (21) та початкові умови (6) для $x(t)$, можемо один раз по t проінтегрувати рівняння (23). Тоді одержимо закон для $\dot{x}(t)$ наступного виду:

$$\dot{x}(t) = \frac{C}{2m} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(\frac{t^3}{3} - \frac{t^4}{4\tau_{II}} \right) + \frac{F_2}{m} \cdot \frac{t^4}{4\tau_{II}^3} - \frac{F_2}{m} \cdot t. \quad (24)$$

Тоді для V_C , яка виражає значення усталеної швидкості підйому вантажу містобудівним краном у кінці періоду пуску (при $t = \tau_{II}$), маємо:

$$V_C = \frac{C}{2m} \cdot \left(\frac{F_1}{m_1} + \frac{F_2}{m} \right) \cdot \left(\frac{\tau_{II}^3}{12} \right) - \frac{F_2}{m} \cdot \frac{3}{4} \cdot \tau_{II}. \quad (25)$$

Зрозуміло, що для заданих значень всіх параметрів $(C, m, m_1, F_1, F_2, \tau_{II})$ величина V_C повинна задовольняти прийнятним для кранових систем обмеженням (допустимим значенням), котрі відповідають задіяним При підйомі вантажів режимам навантаження кранової системи.

5 ВИСНОВКИ

1. У роботі обґрунтована фізико-механічна модель та встановлені основні параметри і закони руху механізму підйому вантажу містобудівних кранів, за яких мінімізуються пружні сили, виникаючи у канатах, у режимах пуску таких систем.

2. У подальшому результати, отримані у даному дослідженні, можуть бути використані для уточнення та вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажів кранами як на стадіях їх проектування, так і у режимах реальної експлуатації.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкрити.

Література

1. Ловейкін В. С. Оптимізація режимів руху машин і механізмів. *Машинознавство*. 1999. №7(25). С.24-31.
2. Горський Б. Є. Динамічне вдосконалення механічних систем. – К.: Віпол, 1995. 292 с.
3. Ловейкін В. С. Критерії оцінки режимів руху механізмів і машин. *Збірник наукових праць НАУУ*. К., 1998. Т.4. С. 8-12.
4. Човнюк Ю. В., Приймаченко О. В., Чередніченко П. П., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз пружних хвилеутворень у канатах вантажопідійомних кранів. *Сучасне будівництво і архітектура*. Зб. наук. праць. Одеса: ОДАБА, 2023. Вип. 4. С. 23-32.
5. Човнюк Ю. В., Кравчук В. Т., Чередніченко П. П., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз коливань, виникаючих у мостовому крані при його наїзді на кінцеві упори. *Містобудування і територіальне планування*. – К.: КНУБА, 2023. Вип. №83. С. 366-373.
6. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин. *Монографія* – К.: ЦП “Компрінт”, 2019. – 292 с.
7. Човнюк Ю. В., Чередніченко П. П., Кравчук В. Т., Остапущенко О. П., Кравченко І. М. Аналіз та оптимізація динамічних навантажень у пружних елементах/канатах будівельних кранів. *Просторовий розвиток*. – К.: КНУБА, 2023. Вип. №3. С. 90-107.
8. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Пастушенко С. І. *Моделювання динаміки механізмів вантажопідійомних машин*. – К. – Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. 286 с.
9. Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Сівак І. М., Гуменюк Ю. О., Кравчук В. Т. *Моделювання, аналіз та оптимізація динаміки режимів руху вантажопідійомних машин*. *Монографія*. – К.: НУБіПУ, 2018. 865с.
10. Човнюк Ю. В., Сівак І. М. *Динаміка вантажопідійомних та будівельних машин*. . – К.: НУБіПУ, 2014. 470с.

References

1. Loveikin V. S. Optymizatsiia rezhymiv rukhu mashyn i mekhanizmv. *Mashynoznavstvo*. 1999. №7(25). S.24-31. {in Ukrainian}
2. Horskyi B. E., Loveikyn V. S. Kryteryi dynamycheskoho sovershenstvovaniya mekhanicheskykh system. *Teoriya mashyn metallurhycheskoho y hornoho oborudovaniya*. – Sverdlovsk: UPU, 1989. Выр.13. S. 98-102. {in Russian}
3. Horskyi B. E. Dynamycheskoe sovershenstvovanye mekhanicheskykh system. – K.: Vipol, 1995. 292 s. {in Russian}
4. Chovniuk Yu.V., Pryimachenko O.V., Cherednichenko P.P., Ostapushchenko O.P., Kravchenko I.M. Analiz pruzhnykh khvyleutvoren u kanatakh vantazhopidiomnykh kraniv. *Suchasne budivnytstvo i arkhitektura*. Zb. nauk. prats. Odesa: ODABA, 2023. Vyp. 4. S. 23-32. {in Ukrainian}
5. Chovniuk Yu.V., Kravchuk V.T., Cherednichenko P.P., Ostapushchenko O.P., Kravchenko I.M. Analiz kolyvan, vynykaiuchykh u mostovomu kranі pry yoho naizdi na kintsevi upory. *Mistobuduvannya i terytorialne planuvannya*. – K.: KNUBA, 2023. Vyp. №83. S. 366-373. {in Ukrainian}
6. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Chovniuk Yu. V., Kadykalo I. O. *Dynamika y optymizatsiia pidiomno-transportnykh mashyn*. *Monohrafiia* – K.: TsP “Komprint”, 2019. – 292 s. {in Ukrainian}
7. Chovniuk Yu. V., Cherednichenko P. P., Kravchuk V. T., Ostapushchenko O. P., Kravchenko I. M. *Analiz ta optymizatsiia dynamichnykh navantazhen u pruzhnykh elementakh/kanatakh budivelnykh kraniv*. *Prostorovi rozvytok*. – K.: KNUBA, 2023. Vyp. №3. S. 90-107. {in Ukrainian}
8. Loveikin V. S., Chovniuk Yu. V., Dikteruk M. H., Pastushenko S. I. *Modeliuvannya dynamiky mekhanizmv vantazhopidiomnykh mashyn*. – K. – Mykolaiv: RVV MDAU, 2004. 286 s. {in Ukrainian}

9. Chovniuk Yu. V., Dikteruk M. H., Sivak I. M., Humeniuk Yu. O., Kravchuk V. T. Modeliuvannia, analiz ta optymizatsiia dynamiky rezhymiv rukhu vantazhopidiomnykh mashyn. Monohrafiia. – К.: NUBiPU, 2018. 865 s. {in Ukrainian}
10. Chovniuk Yu. V., Sivak I. M. Dynamika vantazhopidiomnykh ta budivelnykh mashyn. . – К.: NUBiPU, 2014. 470 s. {in Ukrainian}

Човнюк Юрій Васильович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
uchovnyuk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0608-0203

Приймаченко Олексій Віталійович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к. т. н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
priumachenko.ov@knuba.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5125-8472

Чередніченко Петро Петрович

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
petro_che@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7161-661X

Турчанінова Людмила Іванівна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
к.ф.-м.н., доцент
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
turchaninova.li@knuba.edu.ua
ORCID:0000-0002-0224-9534

Шудра Наталія Сергіївна

Київський Національний університет будівництва та архітектури,
ст. викладач
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03037
Shudra_n@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5416-7680

Для посилань:

Човнюк Ю. В., Приймаченко О. В., Чередніченко П. П., Турчанінова Л. І., Шудра Н. С. Фундаментальний аналіз та оптимізація (мінімізація) динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу кранів. Частина I. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 1. С. 74–83.

For references:

Yu. Chovniuk, O. Priymachenko, P. Cherednichenko, L. Turchaninova, N. Shudra. (2024). Fundamental analysis and optimization (minimization) of dynamic loads in elastic elements of cranes load lifting mechanisms. Part I. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 74–83.