Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 4, 5-11
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2019.04.005-011

УДК 621.873(07)

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ. ЧАСТИНА ІІ

В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, І. О. Кадикало

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net, ychovnyuk@ukr.net, kadykaloivan@nubip.edu.ua.

Історія статті: отримано – серпень 2019, акцептовано – листопад 2019.
Бібл. 30, рис. 4, табл. 0.

Анотація. Під час роботи вантажопідйомної техніки в елементах приводу та металоконструкції виникають значні динамічні навантаження, що призводять до пришвидшеного виходу елементів конструкції і механізмів з ладу та виникнення аварійних ситуацій. Питання усунення динамічних навантажень не вирішене і досі, тому в даній роботі проведена оптимізація динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) вантажопідйомних кранів при різних способах підйому вантажу: «з підхватом», «з ваги», «з землі». У якості критерію оптимізації (мінімізації вказаних навантажень) у перехідних режимах функціонування вантажопідйомного крана (пуск, гальмування, реверсування) запропонований, функціонал, який є середньоквадратичним значенням коефіцієнта динамічності на інтервалі часу, що відповідає тривалості перехідного процесу, і приймає мінімальне значення. Для розв'язку задачі оптимізації режиму руху механізму підйому вантажу використовувались методи класичного варіаційного числення. За допомогою цих методів встановлені відповідні (оптимальні) режими (закони) руху вантажу та електромеханічної системи приводного механізму підйому.

Отримані у даному дослідженні результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому кранів з вантажем на гнучкому підвісі як на стадіях їх проектування/конструювання, так і в умовах реальної експлуатації.

Ключові слова: оптимізація, динаміка, навантаження, канати, вантажопідйомні крани, способи підйому, вантаж.

Постановка проблеми

Вантажопідйомні та транспортуючі машини є невід'ємним елементом (частиною) сучасного виробництва, оскільки з їх допомогою здійснюється механізація основних технологічних процесів й допоміжних робіт. У поточних й автоматизованих лініях роль підйомно-транспортних машин якісно зросла й вони стали органічною частиною технологічного обладнання, а вплив їх на техніко-економічні показники підприємства став доволі суттєвим.

Задля збільшення виробництва прогресивних засобів механізації підйомно–транспортних, навантажувально-розвантажувальних та складських робіт, у тому числі вантажопідйомних машин з дистанційним та програмним керуванням, збільшення продуктивності й покращення техніко–економічних показників підйомно-транспортних машин, підвищення їх міцності, надійності й довговічності необхідно застосовувати новітні методи розрахунку й конструювання, постійно їх уточнювати й вдосконалювати. Особливо актуальним є вирішення проблем зменшення динамічних навантажень на пружні елементи (канати) вантажопідйомних кранів, коли останні функціонують у перехідних режимах роботи (пуск, гальмування, реверсування тощо).

Аналіз останніх досліджень

У період неусталеного руху у механізмах підйому вантажу кранів постійно виникають динамічні навантаження коливного характеру [1]. Величина й характер цих навантажень залежать від степеню пружності з'єднуючих ланцюгів, величин і розподілу рухомих мас у системі, законів зміни зовнішніх навантажень – рушійних сил і сил опорів. Вплив навантажень на пружну систему призводить й до коливань мас, і у пружних зв'язках виникають динамічні навантаження, особливо у механізмах пересування й повороту при різких пусках і гальмуванні. Значний внесок у розробку питань динаміки вантажопідйомних машин внесли А.А. Вайнсон [2], М.П. Александров [3, 4], С.А. Казак [5], М.С. Комаров [6], М.М. Гохберг [7], В.С. Ловейкін [17-23]. Також питанням дослідження і усунення небажаних процесів під час роботи вантажопідйомної техніки займались закордонні науковці та вчені [25-30] та ряд інших вітчизняних науковців [8-16]. У цитованих вище роботах розглянуті важливі

аспекти функціонування вантажопідйомних кранів, наведені типові розрахункові схеми для моделювання динамічних процесів, що відбуваються у механізмах підйому вантажу, закріпленого на канатах, визначені динамічні коефіцієнти навантажень у пружних елементах тощо. Проте, на думку авторів даного дослідження, питанням оптимізації (мінімізації динамічних навантажень) режимів руху вантажопідйомних механізмів, що функціонують у перехідних (швидкоплинних) умовах, приділено недостатню увагу дослідників. Ці проблеми, задачі слід розв'язувати, використовуючи сучасні, науково обґрунтовані методи (наприклад, методи математичної фізики та класичного варіаційного числення), постійно уточнюючи й вдосконалюючи розрахункові схеми вказаних вище механізмів з наявними у них пружними елементами (канатами), які й приводять до виникнення небажаних коливних процесів у елементах вантажопідйомних кранів і, як наслідок, до динамічних перевантажень цих елементів й інших вузлів.

У даному дослідженні будуть частково використані результати роботи [1].

Мета досліджень

Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні (із використанням аналітичних методів та підходів) оптимальних режимів функціонування вантажопідйомних кранів у перехідних процесах (пуску, гальмування, реверсування) за різних способів підйому вантажу («з ваги», «з підхватом», «з землі»), які дозволяють мінімізувати протягом проміжку часу, що триває перехідний процес, динамічні навантаження у пружних елементах (канатах). Крім того, при реалізації мети роботи встановлені: 1) закони руху окремих елементів вантажопідйомного механізму крана (власне вантажу й електромеханічної системи його підйому), які відповідають заданим критеріям якості таких рухів; 2) визначені основні параметри цих режимів.

Результати досліджень

Оптимізація режимів руху механізму підйому вантажу крана (мостового типу) при постійному значенні рушійної сили P (не є функцією часу t) для різних способів підйому (вантажу) може бути здійснена на основі викладених нижче міркувань.

Диференціальні рівняння руху мас у перехідний період роботи механізму підйому вантажу (наприклад, пуску) мають вид [1]:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + C \cdot (x_1 - x_2) = P; & \ddot{x}_1 = \dfrac{d^2 x_1}{dt^2}; \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - C \cdot (x_1 - x_2) = -Q; & \ddot{x}_2 = \dfrac{d^2 x_2}{dt^2}; \end{cases} \quad (1)$$

де x_1, x_2 – переміщення відповідно першої і другої мас; Q взята зі знаком мінус як сила опору.

У рівняннях (1) перші складові – сили інерції відповідної маси, другі – сили пружності у зв'язку.

У правій частині рівнянь (1) – сили, діючі на систему у період неусталеного руху.

З двох рівнянь системи (1), після нескладних перетворень і введення нової змінної $x = (x_1 - x_2)$ – різниці переміщень мас, можна отримати одне диференціальне рівняння для x:

$$\ddot{x} + p^2 \cdot x = \frac{m_2 \cdot P + m_1 \cdot Q}{m_1 \cdot m_2}, \quad (2)$$

де $p = \sqrt{\dfrac{C \cdot (m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}$ - кругова частота власних коливань двомасової системи, c^{-1}.

Рівняння (2) після нескладних перетворень можна подати у наступному виді:

$$\ddot{x} + p^2 \cdot x = P_n \cdot \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}. \quad (3)$$

Домножимо ліву й праву частини рівняння (3) на C і врахуємо ту обставину, що $x = x(t) \Leftrightarrow P_\partial = P_\partial(t)$. Тоді, замість (3) можна отримати рівняння для $P_\partial(t)$:

$$\ddot{P}_\partial + p^2 \cdot P_\partial = p^2 \cdot P_n. \quad (4)$$

З цього рівняння легко визначити $P_\partial(t)$:

$$P_\partial(t) = P_n - \frac{\ddot{P}_\partial}{p^2}. \quad (5)$$

Оскільки $k_\partial = P_\partial / P_n$, тоді з (5) маємо:

$$k_\partial(t) = \left\{ 1 - \ddot{P}_\partial \Big/ \left(p^2 \cdot P_n \right) \right\}. \quad (6)$$

У якості критерію якості руху досліджуваної механічної системи обираємо наступний:

$$\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \{k_\partial(t)\}^2 dt \Rightarrow \min. \quad (7)$$

Враховуючи співвідношення (6), критерій (7) можна подати наступним чином:

$$\frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} \left\{ 1 - \frac{\ddot{P}_\partial}{p^2 \cdot P_n} \right\}^2 dt \Rightarrow \min. \quad (8)$$

Необхідною умовою досягнення критерію (8) є рівняння Ейлера–Пуассона виду:

$$P_\partial^{(IV)}(t) = 0 \Leftrightarrow x^{(IV)}(t) = 0. \quad (9)$$

Розв'яжемо рівняння (9) для $x(t)$ за початкових умов (А – $x\big|_{t=0} = 0$; $\dot{x}\big|_{t=0} = \dfrac{dx}{dt}\Big|_{t=0} = 0,$), (Б – $x\big|_{t=0} = 0$; $\dot{x}\big|_{t=0} = V_o,$), (В – $x\big|_{t=0} = \dfrac{Q}{C}$; $\dot{x}\big|_{t=0} = 0,$). Оскільки рівняння (9) четвертого порядку, то необхідно мати ще одну початкову умову для того, щоб знайти однозначне рішення (розв'язок) цього диференційного рівняння. Задля знаходження вказаної початкової умови використаємо рівняння (4) яке один раз продиференціюємо. Звідси матимемо:

$$\dddot{x} + p^2 \cdot \dot{x} = 0 \Leftrightarrow \dddot{x}\,|_{t=0} = -p^2 \cdot \dot{x}\,|_{t=0}. \quad (10)$$

Отже, для кожного варіанту початкових умов (п.п. А, Б, В) маємо обґрунтоване початкове значення $\dddot{x}|_{t=0}$ (т.з. різкості руху системи).

А. Підйом «з підхватом» (вантажу).

$$t=0:\quad x|_{t=0}=0;\quad \dot{x}|_{t=0}=0;\quad \ddot{x}=\left(\frac{p^2\cdot P_n}{C}-p^2\cdot x\right)\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \ddot{x}|_{t=0}=\frac{p^2\cdot P_n}{C};\quad \dddot{x}|_{t=0}=0. \qquad (11)$$

Розв'язок рівняння (9) за початкових умов (11) має вид:

$$x(t)=\frac{p^2\cdot P_n}{2\cdot C}\cdot t^2. \qquad (12)$$

При цьому для $P_\partial(t)$ маємо:

$$P_\partial(t)=C\cdot x(t)=\frac{p^2\cdot P_n}{2}\cdot t^2. \qquad (13)$$

Для функції $k_\partial(t)$ можна отримати:

$$k_\partial(t)=\frac{P_\partial(t)}{P_n}=\frac{p^2\cdot t^2}{2}; \qquad (14)$$

$$\overline{\left(k_\partial(t)\right)^2_{t_p}}=\frac{1}{t_p}\cdot\int_0^{t_p}k_\partial^2(t)dt=\frac{p^4\cdot t_p^4}{20}; \qquad (15)$$

$$\overline{\left(k_\partial(t)\right)_{t_p}}=\frac{1}{t_p}\cdot\int_0^{t_p}k_\partial(t)dt=\frac{p^2\cdot t_p^2}{6}. \qquad (16)$$

Середньоквадратичне значення $k_\partial(t)$ на інтервалі часу $t\in[0,t_p]$ знаходимо зі співвідношення:

$$\overline{\left(k_\partial(t)_{скв}\right)_{t_p}}=\sqrt{\overline{\left(k_\partial(t)\right)^2_{t_p}}}=\frac{p^2\cdot t_p^2}{2\sqrt{5}}. \qquad (17)$$

Отже, з порівняння виразів (49) й (50) видно, що:

$$\overline{\left(k_\partial(t)_{скв}\right)_{t_p}}>\overline{\left(k_\partial(t)\right)_{t_p}}. \qquad (18)$$

Графік залежності $k_\partial(t)$ (14) наведений на рис. 1.

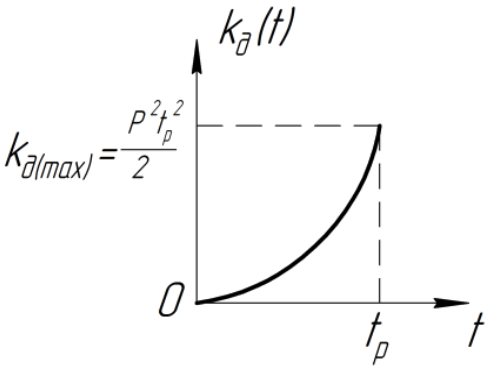

Рис. 1. Залежність $k_\partial(t)$ (14).

Fig. 1. Characteristic curve $k_\partial(t)$ (14).

Б. Підйом «з підхватом» (вантажу) – уточнений варіант.

$$x|_{t=0}=0;\quad \dot{x}|_{t=0}=V_o;\quad \ddot{x}|_{t=0}=\frac{p^2\cdot P_n}{C};\quad \dddot{x}|_{t=0}=-p^2\cdot V_o. \qquad (19)$$

Розв'язок рівняння (9) за початкових умов (19) має вид:

$$x(t)=V_o\cdot t+\frac{p^2\cdot P_n}{2\cdot C}\cdot t^2+\left(-\frac{p^2\cdot V_o}{6}\right)\cdot t^3. \qquad (20)$$

Для $P_\partial(t)$ у цьому випадку маємо:

$$P_\partial(t)=C\cdot V_o\cdot t+\frac{p^2\cdot P_n}{2}\cdot t^2-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o}{6}\cdot t^3. \qquad (21)$$

Для $k_\partial(t)$ можна отримати:

$$k_\partial(t)=\frac{C\cdot V_o\cdot t}{P_n}+\frac{p^2\cdot t^2}{2}-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o}{6\cdot P_n}\cdot t^3. \qquad (22)$$

Для середньоквадратичного значення $k_\partial(t)$ на інтервалі часу $t\in[0,t_p]$ маємо:

$$\overline{\left(k_\partial(t)_{скв}\right)_{t_p}}=\left\{\frac{1}{t_p}\cdot\int_0^{t_p}\left[k_\partial(t)\right]^2dt\right\}^{1/2}=$$

$$=\left\{\begin{array}{l}\dfrac{C^2\cdot V_o^2\cdot t_p^2}{3\cdot P_n^2}+\dfrac{p^4\cdot t_p^4}{20}+\dfrac{C^2\cdot p^4\cdot V_o^2\cdot t_p^6}{252\cdot P_n^2}+\dfrac{CV_o\cdot p^2\cdot t_p^3}{4\cdot P_n}-\\ -\dfrac{C^2\cdot V_o^2 p^2\cdot t_p^4}{15\cdot P_n^2}-\dfrac{C\cdot p^4\cdot V_o\cdot t_p^5}{36\cdot P_n}\end{array}\right\}^{1/2}. \qquad (23)$$

Для середнього значення $k_\partial(t)$ на інтервалі $t\in[0,t_p]$ маємо:

$$\overline{\left(k_\partial(t)\right)_{t_p}}=\frac{C\cdot V_o\cdot t_p}{2P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{6}-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o\cdot t_p^3}{24\cdot P_n}. \qquad (24)$$

Графік залежності $k_\partial(t)$ (22) подані на рис. 2.

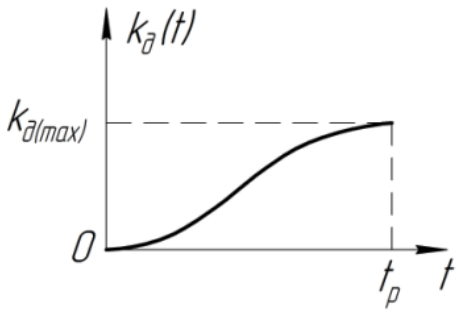

Рис. 2. Залежність $k_\partial(t)$ (22):

$$k_{\partial\max}=\frac{C\cdot V_o\cdot t_p}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o\cdot t_p^3}{6\cdot P_n}.$$

Fig. 2. Characteristic curve $k_\partial(t)$ (22):

$$k_{\partial\max}=\frac{C\cdot V_o\cdot t_p}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o\cdot t_p^3}{6\cdot P_n}.$$

В. Підйом «з ваги» (вантажу).

$$x|_{t=0}=\frac{Q}{C};\quad \dot{x}|_{t=0}=0;\quad \ddot{x}|_{t=0}=\frac{p^2}{C}\left(P_n-Q\right);\quad \dddot{x}|_{t=0}=0. \qquad (25)$$

Розв'язок рівняння (9) за початкових умов (25) має вид:

$$x(t)=\frac{Q}{C}+\frac{p^2}{2C}\cdot\left(P_n-Q\right)\cdot t^2. \qquad (26)$$

Відповідно, для $P_\partial(t)$ маємо:

$$P_\partial(t)=Q+\frac{p^2}{2}\cdot\left(P_n-Q\right)\cdot t^2. \qquad (27)$$

Для $k_\partial(t)$ у цьому випадку можна отримати:

$$k_\partial(t)=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2}{2}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right)\cdot t^2. \qquad (28)$$

Середньоквадратичне значення $k_\partial(t)$ на інтервалі часу $t\in[0,t_p]$ має вид:

$$\overline{\left(k_\partial(t)_{скв}\right)_{t_p}}=\left\{\frac{Q^2}{P_n^2}+\frac{p^4\cdot t_p^4\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right)^2}{20}+\frac{Q}{P_n}\cdot\frac{p^2\cdot t_p^2}{3}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right)\right\}^{1/2}. \qquad (29)$$

Для середнього значення $k_\partial(t)$ на інтервалі часу $t\in[0,t_p]$ маємо:

$$\overline{\left(k_\partial(t)\right)_{t_p}}=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{6}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right). \qquad (30)$$

Графік залежності $k_\partial(t)$ (28) поданий на рис. 3.

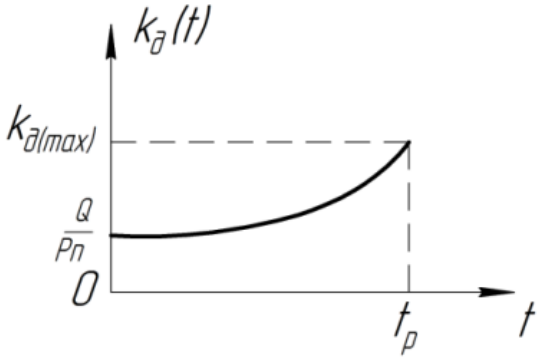

Рис. 3. Залежність $k_\partial(t)$ (28):

$$k_{\partial\max}=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right),\ \frac{Q}{P_n}<1.$$

Fig. 3. Characteristic curve $k_\partial(t)$ (28):

$$k_{\partial\max}=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right),\ \frac{Q}{P_n}<1.$$

Якщо виконується умова $\frac{Q}{P_n}>1$, тоді залежність $k_\partial(t)$ (28) має іншу, відмінну від рис. 3, графічну інтерпретацію (рис. 4).

Знаючи оптимальний закон руху $x(t)$ для різних початкових умов(пп. А, Б, В), легко з рівнянь системи (1) знайти закони руху $x_1(t)$ й $x_2(t)$. Вони наведені нижче. Спочатку запишемо рівняння системи (1) у іншій формі:

$$\begin{cases}\ddot{x}_1=-\frac{C}{m_1}\cdot x(t)+\frac{P}{m_1};\\ \ddot{x}_2=\frac{C}{m_2}\cdot x(t)-\frac{Q}{m_2}.\end{cases} \qquad (31)$$

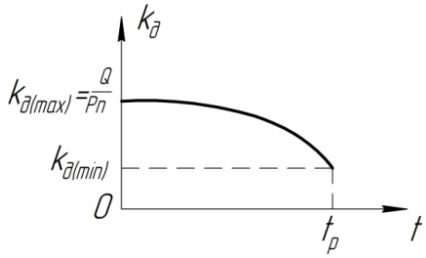

Рис. 4. Залежність $k_\partial(t)$ (28) при $\frac{Q}{P_n}>1$:

$$k_{\partial\min}=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right).$$

Fig. 4. Characteristic curve $k_\partial(t)$ (28) at $\frac{Q}{P_n}>1$:

$$k_{\partial\min}=\frac{Q}{P_n}+\frac{p^2\cdot t_p^2}{2}\cdot\left(1-\frac{Q}{P_n}\right).$$

А. Підйом «з підхватом».

$$\left\{x|_{t=0}=0;\ \dot{x}|_{t=0}=0;\right\}\Leftrightarrow\left\{\begin{matrix}x_1|_{t=0}=0;\ \dot{x}_1|_{t=0}=0;\\ x_2|_{t=0}=0;\ \dot{x}_2|_{t=0}=0;\end{matrix}\right\}, \qquad (32)$$

Оскільки маса m_2 (вантаж) не рухається. При цьому $x(t)$ описується залежністю (12). Маючи початкові умови (32) (нульові для x_1 й x_2 – координат та їх похідних по часу t), легко знаходимо для цього випадку закони руху мас m_1 й m_2:

$$\begin{cases}x_1(t)=\frac{P\cdot t^2}{2m_1}-\frac{p^2\cdot P_n\cdot t^4}{24m_1};\\ x_2(t)=-\frac{Q\cdot t^2}{2m_2}+\frac{p^2\cdot P_n\cdot t^4}{24m_2}.\end{cases} \qquad (33)$$

Б. Підйом «з підхватом» (уточнений варіант).

$$\left\{x|_{t=0}=0;\ \dot{x}|_{t=0}=V_o;\right\}\Leftrightarrow\left\{\begin{matrix}x_1|_{t=0}=0;\ \dot{x}_1|_{t=0}=V_o;\\ x_2|_{t=0}=0;\ \dot{x}_2|_{t=0}=0;\end{matrix}\right\}. \qquad (34)$$

Умови (34) у зв'язку з тим, що й у цьому варіанті маса m_2 нерухома, а рух відбувається лише у маси m_1. При цьому $x(t)$ описується залежністю (20). Для законів руху мас m_1 й m_2 у цьому випадку можна отримати:

$$\begin{cases}x_1(t)=\frac{P}{m_1}\cdot\frac{t^2}{2}+V_o\cdot t-\frac{C\cdot V_o\cdot t^3}{6m_1}-\frac{p^2\cdot P_n\cdot t^4}{24m_1}+\frac{C\cdot p^2\cdot V_o\cdot t^5}{120m_1};\\ x_2(t)=-\frac{Q}{m_2}\cdot\frac{t^2}{2}+\frac{C\cdot V_o\cdot t^3}{6m_2}+\frac{p^2\cdot P_n\cdot t^4}{24m_2}-\frac{C\cdot p^2\cdot V_o\cdot t^5}{120m_2}.\end{cases} \qquad (35)$$

В. Підйом «з ваги».

$$\left\{x|_{t=0}=\frac{Q}{C};\ \dot{x}|_{t=0}=0;\right\}\Leftrightarrow\left\{\begin{matrix}x_1|_{t=0}=\frac{Q}{C};\ \dot{x}_1|_{t=0}=0;\\ x_2|_{t=0}=0;\ \dot{x}_2|_{t=0}=0;\end{matrix}\right\}. \quad (36)$$

І у цьому випадку вважаємо у початковий момент масу m_2 нерухомою. Закон $x(t)$ описується залежністю (26). Для законів руху мас m_1 й m_2 у цьому випадку маємо:

$$\begin{cases} x_1(t)=\dfrac{Q}{C}+\dfrac{(P-Q)t^2}{2m_1}-\dfrac{p^2\cdot t^4}{24m_1}(P_n-Q); \\ x_2(t)=\dfrac{p^2\cdot t^4}{24m_2}\cdot(P_n-Q). \end{cases} \quad (37)$$

Висновки

1. У межах моделі дискретними (зосередженими) параметрами встановлені закони руху механічної двомасової моделі, яка моделює функціонування механізму підйому вантажу (мостового) крана, для трьох способів підйому вантажу: а) «з підхватом», «з ваги», «з землі». Аналітично описані основні характеристики цих рухів коливного характеру: 1) амплітуда; 2) частота; 3) період; 4) коефіцієнт динамічності.

2. Запропоновані критерії якості руху, котрі дозволяють у режимах пуску мінімізувати коефіцієнт динамічності для всіх трьох, зазначених вище, способів підйому вантажу та закони руху механічної системи, які задовольняють вказаним критеріям.

3. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажу різними способами («з ваги», «з підхватом», «з землі») при функціонуванні кранів у перехідних режимах (пуску, гальмування, реверсу та ін.) і у режимах реальної експлуатації.

Список літератури

1. *Иванченко Ф. К., Бондарев В. С., Колесник Н. П., Барабанов В. Я.* Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев. Вища школа. 1978. 756 с.

2. *Вайнсон А. А.* Строительные краны. Машиностроение. 1970.

3. *Александров М. П.* Подъемно-транспортные машины. Высшая школа. 1972.

4. *Александров М. П.* Грузоподъемные машины. Высшая школа. 1973.

5. *Казак С. А.* Динамика мостовых кранов. Машиностроение. 1968.

6. *Комаров М. С.* Динамика механизмов и машин. Машиностроение. 1968.

7. *Гохберг М. М.* Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Машиностроение. 1969.

8. *Березниченко З. А., Климченкова Н. В., Лагуненков С. В.* Разработка рациональных режимов управления электромеханической системой мостового крана. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2012. №4 (29). С. 6-11.

9. *Герасимяк Р. П., Лещев А. А.* Анализ и синтез крановых электромеханических систем. Одесса: СМИЛ. 2008. 192 с.

10. *Александров М. П.* Динамика грузоподъемных кранов. 1986. 400 с.

11. *Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г.* Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики. Наука. 1983. 328 с.

12. *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике. АСТ: Астрель. 2006. 991 с.

13. *Гусак А. А., Гусак Г. М., Бричикова Е. А.* Справочник по высшей математике. Минск: ТетраСистемс. 1999. 640 с.

14. *Бронштейн И. Н., Семендеев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУзов. Наука. 1986. 544 с.

15. *Климченкова Н. В., Корниенко С. В.* Повышение степени автоматизации технологического процесса перемещения груза кранами. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр. 2008. №41. С. 41–44.

16. Спосіб вертикального переміщення вантажів краном Патент №27558 Україна. №u200705695; заявл. 23.05.07; опубл. 12.11.2007, Бюл. №18.

17. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О.* Динаміка і оптимізація режимів руху мостових кранів. Монографія. Київ. *ЦП «КОМПРІНТ»*. 2016. 314 с.

18. *Ловейкін В. С., Пилипака С. Ф., Кадикало І. О.* Динамічний аналіз механізма повороту стрілового крана. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ. 2017. Вип. 258. С. 192–202.

19. *Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О.* Оптимізація режимів руху механізмів обертання вантажопідйомних кранів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ. 2017. Вип. 262. С. 177–190.

20. *Ловейкін, В. С., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О.* Аналіз умов існування стаціонарних режимів (автоколивань) при роботі мостових кранів. *Підйомно-транспортна техніка*. Одеса. 2016. Вип. 3. С. 4-15.

21. *Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О.* Динамічна оптимізація вантажопідйомних механізмів кранів при підйомі вантажу «з підхватом». *Научный вестник ДГМА*. 2016. Вип. 2(20Е). С. 90-98.

22. *Ловейкин, В. С. Човнюк Ю. В., Кадыкало И. А.* Уточненный анализ и минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело.* 2016. Т.15, №21. С.354–361. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.7

23. *Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Пастушенко С. І.* Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин: монографія. Київ. нац. ун-

т буд-ва і архіт. Миколаїв. держ. аграр. ун-т. Київ. Миколаїв. Вид-во РВВ МДАУ. 2004. 288 с.

24. *Григоров О. В., Петренко О. В.* Вантажопідйомні машини: навч. посібник. Х. НТУ „ХПІ”. 2006. 304 с.

25. *Stanišić, M. M.* On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses. Ingenieur-Archiv. 1985. vol. 55(3). P. 176-185. DOI:10.1007/bf00536412.

26. *Tanizumi, K., Hino, J., Yoshimura, T., & Sakai, T.* Modelling of Dynamic Behavior and Control of Truck Cranes. (Modelling of Dynamic Behavior of Truck Cranes with Hydraulic System in Swing Operation). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C. 1994. vol. 60(572). P. 1262–1269. DOI: 10.1299/kikaic.60.1262.

27. *Lee, H. P.* Dynamic response of a beam with a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*. 1996. vol. 191(2). P. 289-294. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0122.

28. *Oguamanam, D. C. D., Hansen, J. S., & Heppler, G. R.* Dynamics of a three-dimensional overhead crane system. *Journal of Sound and Vibration*. 2001. vol. 242(3). P. 411-426. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3375.

29. *Sun, G., & Kleeberger, M.* Dynamic responses of hydraulic mobile crane with consideration of the drive system. *Mechanism and Machine Theory*. 2003. vol. 38(12). P. 1489-1508. DOI: 10.1016/s0094-114x(03)00099-5.

30. *Campara, T., Bukvic, H., Sprecic, D.* Ability to Control Swinging of Payload during the Movement of the Rotary Cranes Mechanism. *4th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems*. Kaunas Univ Technol Panevezys Inst. Kaunas. LITHUANIA. 2009. P. 52-55.

References

1. *Yvanchenko F. K., Bondarev V. S., Kolesnyk N. P., Barabanov V. Ya.* (1978). Calculations of lifting and transporting machines. Kyev. Vyshcha shkola. 756.

2. *Vainson A. A.* (1970). Building cranes. Mashynostroenye.

3. *Aleksandrov M. P.* (1972). Hoisting machines. Vyshcha shkola.

4. *Aleksandrov M. P.* (1973). Hoisting machines. Vyshcha shkola.

5. *Kazak S. A.* (1968). The dynamics of overhead cranes. Mashynostroenye.

6. *Komarov M. S.* (1968). Dynamics of mechanisms and machines. Mashynostroenye.

7. *Hokhberh M. M.* (1969). Metal structures of hoisting machines. Mashynostroenye.

8. *Bereznychenko Z. A. Klymchenkova N. V. Lahunenkov S. V.* (2012). Development of rational control modes for the electromechanical system of an overhead crane. Bulletin of the Donbass State Engineering Academy. №4 (29). 6-11.

9. *Herasymiak R. P. Leshchev A. A.* (2008). Analysis and synthesis of crane electromechanical systems. Odessa. SMYL. 192.

10. *Aleksandrov M. P.* (1986). Crane Dynamics. 400.

11. *Blekhman Y. Y. Myshkys A. D. Panovko Ya. H.* (1983). Mechanics and Applied Mathematics: Logic and Features of Mathematics Applications. Nauka. 328.

12. *Vyhodskyi M. Ya.* (2006). Handbook of Higher Mathematics. AST. Astrel. 991.

13. *Husak A. A. Husak H. M. Brychykova E. A.* (1999). Handbook of Higher Mathematics. Mynsk. TetraSystems. 640.

14. *Bronshtein Y. N. Semendeev K. A.* (1986). Math Reference for Engineers and Students VTUzov. Nauka. 544 p.

15. *Klymchenkova N. V. Kornyenko S. V.* (2008). Increasing the degree of automation of the technological process of moving cargo by cranes. East European Journal of Advanced Technology. Kharkov. Tekhnolohycheskyi Tsentr. №41. 41–44.

16. *Klimchenkova N. V. Spaska A. M.* (2007). Method of vertical movement of cargo by crane. Patent of Ukraine for useful model B 66719/00. №27558. №u200705695; declared. 23.05.07; published. 12.11.2007, №18.

17. *Loveikin V. S. Romasevych Yu. O.* (2016). Dynamics and optimization of modes of movement of bridge cranes. Monograph. Kyiv. TsP «KOMPRINT». 314.

18. *Loveikin, V. S., Pylypaka, S. F., Kadykalo, I. O.* (2017). Dynamic analysis of the mechanism of rotation of the jib crane. Scientific Herald of National University of Life and Enviromental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. Kyiv. Vol. 258. P. 192-202.

19. *Loveikin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Kadykalo, I. O.* (2017). Optimization of modes of movement of rotating mechanism of cranes. Scientific Herald of National University of Life and Enviromental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. Kyiv. Vol. 262. 177-190.

20. *Loveikin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Kadykalo, I. O.* (2016). Analysis of conditions of existence of stationary modes (self-oscillations) during operation of bridge cranes. Hebezeuge und Fцrdermitte. Odesa. Vol. 3. 4-15.

21. *Loveikin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Kadykalo, I. O.* (2016). Dynamic optimization of hoisting mechanisms of cranes when lifting cargo "with pickup". DGMA Scientific Bulletin. Vol. 2(20E). 90-98.

22. *Loveikin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Kadykalo, I. O.* (2016). Updated analysis and minimization of dynamic loads in elastic elements of lifting equipment. Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining. Vol.15. №21. 354–361. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.7.

23. *Loveikin V. S. Chovniuk Yu. V. Dikteruk M. H. Pastushenko S. I.* (2004). Modeling of dynamics of mechanisms of load-lifting machines. Monograph. Kyiv. Nats. Un-T Bud-Va I Arkhit. Mykolaiv. Derzh. Ahrar. Un-T. K. Mykolaiv. RVV MDAU. 288.

24. *Grigorov, O. V., Petrenko, N. O.* (2006). Hoisting machines: navch. posibnik. NTU „HPI”. 304.

25. *Stanišić, M. M.* (1985). On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses. Ingenieur-Archiv. 55(3). 176-185. DOI:10.1007/bf00536412.

26. *Tanizumi, K., Hino, J., Yoshimura, T., & Sakai, T.* (1994). Modelling of Dynamic Behavior and Control of Truck Cranes. (Modelling of Dynamic Behavior of Truck Cranes with Hydraulic System in Swing Operation). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C. 60(572). 1262–1269. DOI: 10.1299/kikaic.60.1262.

27. *Lee, H. P.* (1996). Dynamic response of a beam with a moving mass. Journal of Sound and Vibration. 191(2). 289-294. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0122.

28. *Oguamanam, D. C. D., Hansen, J. S., & Heppler, G.R.* (2001). Dynamics of a three-dimensional overhead crane system. Journal of Sound and Vibration. 242(3). 411-426. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3375.

29. *Sun, G., & Kleeberger, M.* (2003). Dynamic responses of hydraulic mobile crane with consideration of the drive system. Mechanism and Machine Theory. 38(12). 1489-1508. DOI: 10.1016/s0094-114x(03)00099-5.

30. *Campara, T., Bukvic, H., Sprecic, D.* (2009). Ability to Control Swinging of Payload during the Movement of the Rotary Cranes Mechanism. 4th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems. Kaunas Univ Technol Panevezys Inst. Kaunas. LITHUANIA. 52-55.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДЪЕМА ГРУЗА. ЧАСТЬ II

В. С. Ловейкин, Ю. В. Човнюк, И. А. Кадыкало

Аннотация. Во время работы грузоподъемной техники в элементах привода и металлоконструкции возникают значительные динамические нагрузки, приводящие к ускоренному выходу элементов конструкции и механизмов из строя и возникновения аварийных ситуаций. Вопрос устранения динамических нагрузок не решен до сих пор, поэтому в данной работе проведена оптимизация динамических нагрузок в упругих элементах (канатах) грузоподъемных кранов при различных способах подъема груза «с подхватом», «с помощью веса», «с земли». В качестве критерия оптимизации (минимизации указанных нагрузок) в переходных режимах функционирования грузоподъемного крана (пуск, торможение, реверсирование) предложен, функционал, который является среднеквадратичным значением коэффициента динамичности на интервале времени, соответствующий длительности переходного процесса, и принимает минимальное значение. Для решения задачи оптимизации режима движения механизма подъема груза использовались методы классического вариационного исчисления. С помощью этих методов установлены соответствующие (оптимальные) режимы (законы) движения груза и электромеханической системы приводного механизма подъема.

Полученные в данном исследовании результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчета механизмов подъема кранов с грузом на гибком подвесе как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: оптимизация, динамика, нагрузка, канаты, грузоподъемные краны, способы подъема, груз.

OPTIMISATION OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF LOAD LIFTING CRANES WITH DIFFERENT METHODS OF LIFTING. PART II

V. S. Loveykin, Yu. V. Chovniuk, I. O. Kadykalo

Abstract. During the work of lifting machinery there are considerable dynamic loads in the elements of the drive and the metal structure, which lead to the rapid failure of the elements of the structure and mechanisms and emergencies. The issue of elimination of dynamic loads has not been solved yet, so in this work, the dynamic loads in the elastic elements (ropes) of load lifting cranes have been optimized within various methods of cargo lifting: “pick-up”, “using weight”, “from the ground”. As a criterion for optimization (minimization of the specified loads) in the transient modes of operation of the crane (start, brake, reversal), the functional, which takes the minimum value and is the root mean square of the dynamic coefficient at the interval of time, corresponding to the duration of the transition, is proposed. Classical variational calculus methods were used to solve the problem of optimizing the mode of motion of the lifting mechanism. With these methods, the appropriate (optimal) modes (laws) of cargo movement and the electromechanical system of the drive mechanism of lifting are established.

The results obtained in this study can be further used to refine and improve existing engineering methods for calculating lifting mechanisms of the crane with flexible suspension both at the design / construction stages and under actual operating conditions.

Key words: optimisation, dynamics, loading, ropes, load lifting cranes, methods of lifting, cargo.

В. С. Ловейкін ORCID 0000-0003-4259-3900.
Ю. В. Човнюк ORCID 0000-0003-1889-0876.
І. О. Кадикало ORCID 0000-0001-8217-866X.