

АРХІТЕКТУРА, БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.873

<https://doi.org/10.31713/vt2202311>

**Човнюк Ю. В., к.т.н., доцент, Чередніченко П. П., доцент,
Золотар Л. В., к.т.н., доцент, Шудра Н. С., ст. викладач** (Київський
Національний університет будівництва та архітектури,
ychovnyuk@ukr.net, petro_che@ukr.net, luydmula.z@gmail.com,
Shudra_n@ukr.net)

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ (МІНІМІЗАЦІЯ) ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ МІСТОБУДІВНИХ КРАНІВ

У роботі розроблено спрощену динамічну модель механічної системи, а саме: механізм підйому вантажу вантажопідйомного крана. Задля визначення динамічних навантажень у пружному канаті використаний підхід, запропонований професором Ловейкіним В. С. зі співавторами, коли використовується динамічна модель, у якій усі ділянки валів вважаються жорсткими, а лише канат – пружним. При цьому здійснюється приведення мас ротора двигуна, гальмівного шківів, зубчастих коліс, барабана і вантажу до гілок канату, які намотуються на барабан механізму підйому вантажу містобудівного крана. Приведення мас та моментів інерції тіл механічної системи базується на рівності кінетичної енергії заданої та приведеної систем; приведення сил і моментів – на рівності робіт (потужностей), які виконують ці сили й моменти та їх приведені величини; приведення жорсткостей – на рівності потенціальних енергій, якими володіють пружні елементи заданої і приведеної систем. Приведення мас, діючих сил та жорсткостей здійснено до гілок канату, що намотується на барабан для механізму підйому вантажопідйомного містобудівного крана. Оскільки у роботі виникає проблема науково обґрунтованого визначення динамічних навантажень у гілках канату протягом періоду пуску (за різних способів підйому вантажу: «з основи»/«з підхватом» або «з ваги»), то приведення здійснюється з двох боків. До верхньої частини канату приводяться усі елементи від двигуна до барабана включно, а до нижньої частини – вантаж і канат.

Використовуючи спеціально введений у роботі критерій якості руху при підйомі вантажу, який мінімізує у період пуску цієї

механічної системи динамічні навантаження у пружному елементі (канаті), встановлені, при застосуванні апарату класичного варіаційного числення, умови (рівняння Ейлера – Пуассона), за яких цей критерій може бути реалізований. Отримані аналітичні співвідношення, які визначають залежність у часі динамічних навантажень канату, котрі у період пуску механізму підйому вантажу набувають мінімальних значень. При цьому у початкових і кінцевих умовах (у так званих термінальних умовах) враховані особливості підйому вантажу різними способами («з ваги», «з основи»/«з підхватом»).

Знайдені залежності та закони руху вантажу й приведеної маси системи «двигун – барабан» можуть у подальшому бути використані для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку подібних механічних систем як при їх проєктуванні, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: аналіз; динамічна оптимізація; мінімізація навантажень; пружні канати; механізм підйому вантажу; спуск; підйом «з ваги»; підйом «з основи»/«з підхватом»; містобудівні крани.

Постановка проблеми. При моделюванні динамічних навантажень, які виникають в пружних елементах (канатах) механізмів підйому вантажу містобудівних кранів у період їх пуску (за різних способів підйому вантажу – з «основи», «з ваги») необхідно визначити стан цієї системи в певний момент часу (t) залежно від конструктивних характеристик (мас, моментів інерції, жорсткостей тощо) і вхідних характеристик. У досліджуваній системі цією характеристикою є рушійний момент на валу двигуна, а виходом такої механічної системи слугує величина (сукупність величин) динамічних навантажень, які виникають у пружних елементах. З метою запобігання аварійних ситуацій (наприклад, розриви канатів у процесі підйому вантажу внаслідок перевантажень) необхідно проводити кількісні оцінки вказаних динамічних навантажень, котрі, у свою чергу, можуть бути використані при розрахунках на міцність у процесі проєктування подібних механічних систем або при виборі режимів їх реальної експлуатації. Більше того, отримані залежності координат основних елементів механічної системи від часу дозволяють передбачити поведінку механізму підйому вантажу містобудівного крана у майбутньому на заданому інтервалі руху.

Розв'язок задачі моделювання, поданий у дослідженні, можна віднести до типу задач, які вирішуються у теорії механічних систем.

Аналіз останніх публікацій по темі дослідження. Моделюванню функціонування механізмів підйому вантажу кранами присвячені роботи [1–10]. Автори вказаних робіт всебічно досліджують динамічні процеси і динамічні навантаження у пружних елементах вантажопідйомних кранів за різних способів підйому вантажу, проте при встановленні умов, за яких виникаючі динамічні навантаження у канатах є мінімальними (саме у період пуску механізму), використовують необґрунтовані у фізичному плані (некоректні) термінальні умови. Це призводить, насамкінець, до некоректних часових залежностей динамічних навантажень у пружних елементах механізмів підйому вантажу містобудівних кранів.

Задля вирішення вказаної проблеми запропоноване це дослідження, у якому частково використані результати цитованих вище робіт.

Мета роботи полягає у обґрунтуванні методу аналізу динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) механізму підйому вантажу містобудівних кранів, який дозволяє встановити оптимальні закони руху елементів вказаної механічної системи, котрі мінімізують динамічні навантаження у канатах за різних способів підйому вантажу («з ваги», «з основи»/«з підхватом»).

Виклад основного змісту дослідження. Динамічна модель механізму підйому вантажу містобудівним краном має вигляд, показаний на рис. 1. Тут прийняті наступні позначення: $m_{П1}$ – приведена маса ротора двигуна, гальмівного шківів, зубчастих коліс та барабана до гілок каната; $m_{П2}$ – приведена маса вантажу до гілок канату; $F_{П1}$, $F_{П2}$ – приведені до канату сили від дії відповідно рушійного моменту на валу двигуна й ваги вантажу; $C_{П}$ – приведена жорсткість гілок канату; (X_1, X_2) – координати центрів мас відповідно $m_{П1}$ й $m_{П2}$.

Для отримання диференціальних рівнянь руху даної механічної системи при відомих параметрах і її динамічної моделі можна використати один з трьох основних методів [3]: 1) метод рівноваги з використанням принципу Даламбера; 2) принцип можливих переміщень; 3) принцип Гамільтона – Остроградського.

Використовуючи, наприклад, умови рівноваги й принцип Даламбера, можна для мас $m_{П1}$ та $m_{П2}$ отримати систему диференціальних рівнянь, які описують рух динамічної моделі,

показаної на рис. 1:

$$\begin{cases} m_{П1} \cdot \ddot{x}_1 + c_{П} \cdot (x_1 - x_2) = F_{П1}; \\ m_{П2} \cdot \ddot{x}_2 - c_{П} \cdot (x_1 - x_2) = -F_{П2}. \end{cases} \quad (1)$$

Якщо ввести позначення $\xi = X_1 - X_2$, тоді нескладними перетвореннями системи (1) останню можна звести до одного звичайного диференціального рівняння другого порядку:

$$\ddot{\xi} + c_{П} \cdot \left(\frac{1}{m_{П1}} + \frac{1}{m_{П2}} \right) \cdot \xi = \frac{F_{П1}}{m_{П1}} + \frac{F_{П2}}{m_{П2}}. \quad (2)$$

У подальшому вважаємо, що $(F_{П1}, F_{П2})$ є константами, незалежними від часу (t) . Введемо додатково ще й позначення:

$$\Omega^2 = c_{П} \cdot \left(\frac{1}{m_{П1}} + \frac{1}{m_{П2}} \right). \quad (3)$$

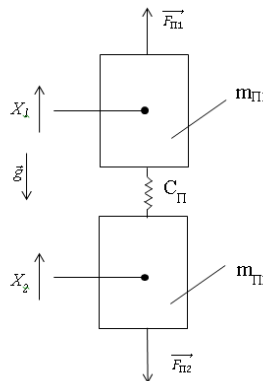


Рис. 1. Спрощена динамічна модель механізму підйому вантажу містобудівного крана (\bar{g} – прискорення вільного падіння, $C_{П}$ – жорсткість канату)

Зусилля в канаті досліджуваної динамічної моделі механізму підйому вантажу містобудівним краном визначається залежністю

$$R = c_{П} \cdot (x_1 - x_2) = c_{П} \cdot \xi. \quad (4)$$

Використовуючи рівняння (2), можна визначити $R(t)$ наступним чином:

$$R(t) = c_{П} \cdot \xi = \left\{ \left(\frac{F_{П1}}{m_{П1}} + \frac{F_{П2}}{m_{П2}} \right) - \ddot{\xi} \right\} \cdot \left(\frac{1}{m_{П1}} + \frac{1}{m_{П2}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Визначимо закон руху $\xi(t)$, за яким виконується наступний критерій якості цього руху:

$$\sqrt{\frac{1}{\tau_{II}} \cdot \int_0^{\tau_{II}} \{c_{II} \cdot \xi(t)\}^2 dt} \Rightarrow \min, \quad (6)$$

де τ_{II} – тривалість періоду пуску даної механічної системи. Необхідною умовою виконання критерію (6) є рівняння Ейлера – Пуассона

$$\xi^{(IV)} = 0. \quad (7)$$

Враховуючи вираз (5) та використовуючи методи класичного варіаційного числення, можна отримати необхідну умову реалізації критерію (6) саме у формі рівняння Ейлера – Пуассона виду (7).

Розглянемо далі два найбільш типові при експлуатації містобудівних кранів способи підйому вантажу, а саме: 1) «з ваги»; 2) «з основи»/«з підхватом». Слід зазначити, що саме конкретний спосіб підйому вантажу краном і визначає початкові умови, які необхідно задовольнити, щоб знайти єдиний розв'язок рівняння (7).

Будемо шукати розв'язок (7) у вигляді сплайну третього порядку по часу t :

$$\xi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3. \quad (8)$$

Коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 можна знайти, виходячи з конкретних початкових умов, які характерні для кожного способу підйому вантажу містобудівним краном.

А. Підйом вантажу «з ваги». Початкові і кінцеві умови руху системи на інтервалі часу $t \in [0, \tau_{II}]$ мають наступний вид[11]:

$$\xi|_{t=0} = \left(\frac{F_{II1}}{m_{II1}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right) \cdot \Omega^{-2}; \quad \dot{\xi}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{\xi}|_{t=0} = 0; \quad \xi|_{t=\tau_{II}} = V_{уст.}, \quad (9)$$

де $V_{уст.}$ – величина усталеної швидкості підйому вантажу містобудівним краном, коли $t \geq \tau_{II}$ (перехідний процес – процес розгону механізму підйому вантажу закінчився). Величина $V_{уст.}$ є нормативною і визначається та регулюється правилами й режимами експлуатації містобудівних кранів.

Підставляючи (8) у початкові/кінцеві умови руху системи підйому вантажу (9), можна отримати наступні результати щодо визначення коефіцієнтів a_0, a_1, a_2, a_3 у сплайні $\xi(t)$ (8):

$$a_0 = \left(\frac{F_{II1}}{m_{II1}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right) \cdot \Omega^{-2}; \quad a_1 = 0; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = \frac{V_{уст.}}{3 \cdot \tau_{II}^2}. \quad (10)$$

Отже, для закону $\xi(t)$ маємо:

$$\xi(t) = a_0 + a_3 \cdot t^3 = \left(\frac{F_{\Pi 1}}{m_{\Pi 1}} + \frac{F_{\Pi 2}}{m_{\Pi 2}} \right) \cdot \Omega^{-2} + \frac{V_{yсм.}}{3 \cdot \tau_{\Pi}^2} \cdot t^3. \quad (11)$$

Для $R(t) = C_{\Pi} \cdot \xi(t) = R_{opt}(t)$ маємо:

$$R_{opt}(t) = c_{\Pi} \cdot (a_0 + a_3 \cdot t^3) = c_{\Pi} \cdot \left\{ \left(\frac{F_{\Pi 1}}{m_{\Pi 1}} + \frac{F_{\Pi 2}}{m_{\Pi 2}} \right) \cdot \Omega^{-2} + \frac{V_{yсм.}}{3 \cdot \tau_{\Pi}^2} \cdot t^3 \right\}. \quad (12)$$

Саме цей закон $R_{opt}(t)$ характеризує динамічні навантаження на канат, за якого виконується критерій якості руху (6) й середньоквадратичне значення $R(t)$ є мінімальним протягом періоду пуску механізму підйому вантажу містобудівним краном, тобто на інтервалі $t \in [0, \tau_{\Pi}]$. Максимального значення динамічне навантаження набуває у момент часу $t = \tau_{\Pi}$ й складає:

$$R_{opt}(t) \Big|_{t=\tau_{\Pi}} = R_{opt}^{(max)} = c_{\Pi} \cdot \left\{ \left(\frac{F_{\Pi 1}}{m_{\Pi 1}} + \frac{F_{\Pi 2}}{m_{\Pi 2}} \right) \cdot \Omega^{-2} + \frac{V_{yсм.} \cdot \tau_{\Pi}}{3} \right\}. \quad (13)$$

Графік $R_{opt}(t)$ за співвідношенням (12) наведений на рис. 2.

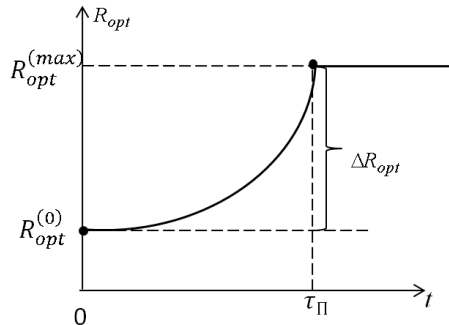


Рис. 2. Залежність $R_{opt}(t)$ для способу підйому вантажу «з ваги» містобудівним краном

Слід зазначити, що функція $R_{opt}(t)$ (12) є монотонно зростаючою і немає різких змін своєї величини. На рис. 2 введено позначення: $R_{opt}(0) = c_{\Pi} \cdot \left(\frac{F_{\Pi 1}}{m_{\Pi 1}} + \frac{F_{\Pi 2}}{m_{\Pi 2}} \right) \cdot \Omega^{-2} = R_{opt}^{(0)}$.

Крім того, з рис. 2 можна встановити, використовуючи співвідношення (13), що:

$$\Delta R_{opt} = R_{opt}^{(max)} - R_{opt}^{(0)} = \frac{c_{\Pi} \cdot V_{yсм.} \cdot \tau_{\Pi}}{3}. \quad (14)$$

Закон руху $m_{II2} X_2(t)$ можна визначити, виходячи з другого рівняння системи (1) та використовуючи співвідношення (12) для нульових початкових умов [11]:

$$x_2(t)|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_2(t)|_{t=0} = 0. \quad (15)$$

Для m_{II2} можна отримати наступний вираз закону $X_2(t)$:

$$x_2(t) = \frac{c_{II}}{m_{II2}} \cdot \left(a_0 \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{a_3 \cdot t^5}{20} \right) - \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (16)$$

Закон руху $m_{III} X_1(t)$ можна визначити, виходячи з першого рівняння системи (1) та використовуючи співвідношення (12) й наступні початкові умови:

$$x_1(t)|_{t=0} = \left(\frac{F_{III1}}{m_{III}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right) \cdot \Omega^{-2}; \quad \dot{x}_1(t)|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

Для m_{III} можна отримати наступний вираз закону $X_1(t)$:

$$x_1(t) = \frac{(-c_{III})}{m_{III}} \cdot \left(\frac{a_0 \cdot t^2}{2} + \frac{a_3 \cdot t^5}{20} \right) + \frac{F_{III1}}{m_{III}} \cdot \frac{t^2}{2} + \left(\frac{F_{III1}}{m_{III}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right) \cdot \Omega^{-2}. \quad (18)$$

Б. Підйом вантажу «з основи»/«з підхватом». Початкові і кінцеві умови руху системи на інтервалі часу $t \in [0, \tau_{II}]$ мають наступний вид [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi(t)|_{t=0} = 0; \quad \dot{\xi}(t)|_{t=0} = V_{ноч}. \quad (V_{ноч.} \rightarrow V_{усм.}); \quad \ddot{\xi}(t)|_{t=0} = \left(\frac{F_{III1}}{m_{III}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right); \\ \dot{\xi}(t)|_{t=\tau_{II}} = V_{усм.} \end{array} \right. \quad (19)$$

Знову розшукуємо розв'язок рівняння (7) у вигляді:

$$\xi(t) = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \cdot t + \tilde{a}_2 \cdot t^2 + \tilde{a}_3 \cdot t^3. \quad (20)$$

Визначаємо константи $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3$ з умов (19).

Маємо наступне:

$$\tilde{a}_0 = 0; \quad \tilde{a}_1 = V_{ноч.}; \quad \tilde{a}_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_{III1}}{m_{III}} + \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \right); \quad \tilde{a}_3 = \frac{V_{усм.} - V_{ноч.} - 2\tilde{a}_2 \cdot \tau_{II}}{3 \cdot \tau_{II}^2}. \quad (21)$$

Отже, закон $\xi(t)$ для цього способу підйому вантажу містобудівним краном набуває наступного вигляду:

$$\xi(t) = \tilde{a}_1 \cdot t + \tilde{a}_2 \cdot t^2 + \tilde{a}_3 \cdot t^3. \quad (22)$$

Для $R(t)$ маємо:

$$R(t) = c_{II} \cdot \xi(t) = c_{II} \cdot \left\{ \tilde{a}_1 \cdot t + \tilde{a}_2 \cdot t^2 + \tilde{a}_3 \cdot t^3 \right\} \quad (23)$$

Закон руху $m_{II2} X_2(t)$ для цього способу підйому вантажу можна визначити, виходячи з другого рівняння системи (1) та використовуючи співвідношення (23) для нульових початкових умов (15).

Тоді для m_{II2} матимемо наступний закон руху $X_2(t)$:

$$x_2(t) = \frac{c_{II}}{m_{II2}} \cdot \left\{ \tilde{a}_1 \cdot \frac{t^3}{6} + \tilde{a}_2 \cdot \frac{t^4}{12} + \tilde{a}_3 \cdot \frac{t^5}{20} \right\} - \frac{F_{II2}}{m_{II2}} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (24)$$

Закон руху $m_{III} X_1(t)$ для цього способу підйому вантажу можна визначити, виходячи з першого рівняння системи (1) та використовуючи співвідношення (23) для наступних початкових умов:

$$x_1(t)|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1(t)|_{t=0} = V_{noc}. \quad (25)$$

Тоді для m_{III} матимемо наступний закон руху $X_1(t)$:

$$x_1(t) = \frac{(-c_{III})}{m_{III}} \cdot \left\{ \tilde{a}_1 \cdot \frac{t^3}{6} + \tilde{a}_2 \cdot \frac{t^4}{12} + \tilde{a}_3 \cdot \frac{t^5}{20} \right\} + \frac{F_{III}}{m_{III}} \cdot \frac{t^2}{2} + V_{noc} \cdot t. \quad (26)$$

Висновки. 1. Обґрунтована математична модель функціонування механізму підйому вантажу містобудівного крану за різних способів підйому вантажу («з підхватом»/«з основи» та «з ваги»).

2. Визначений критерій якості руху такої механічної системи, за якого мінімізується середньоквадратичне значення динамічного напруження у канаті у процесі пуску системи на інтервалі часу $t \in [0, \tau_{II}]$.

3. Визначені аналітичним шляхом для різних способів підйому вантажу оптимальні (мінімальні) значення динамічних навантажень канату у період пуску системи, а також закони руху приведеної маси вантажу до гілок канату й приведеної маси ротора двигуна, гальмівного шківa, зубчастих коліс та барабана до гілок каната.

4. Отримані у роботі результати можуть у подальшому бути використані для уточнення і вдосконалення інженерних розрахунків механізмів підйому вантажу містобудівних кранів, керованих мехатронними системами управління, як на стадіях їх проєктування, так і у режимах реальної експлуатації.

1. Горский Б. Е., Ловейкин В. С. Методика составления операторов передачи движения. *Горные, строительные и дорожные машины*. К. : Техніка, 1979. Вип. 28. С. 99–105. 2. Ловейкин В. С. Расчёты оптимальных

режимов движения механизмов строительных машин. К. : УМК ВО, 1990. 168 с. **3.** Ловеikin В. С., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Теорія механічних систем. Київ-Полтава : ІЗМН-ПДТУ, 1998. 175 с. **4.** Зубко Н. Ф. Прогнозирование коэффициентов динамичности в элементах крановых механизмов. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2013. № 2(38). С. 63–71. **5.** Комаров М. С. Динамика грузоподъемных машин. К.– М. : Mashgiz, 1969. 267 с. **6.** Казак С. А. Динамика мостовых кранов. М. : Машиностроение, 1968. 332 с. **7.** Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути. М. : МГТУ, 2003. 232 с. **8.** Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины. К. : Вища школа, 1989. 208 с. **9.** Слепужников Є. Д. Визначення динамічних навантажень при пересуванні вантажного візка мостового крана. *Машинобудування*. 2015. № 16. С. 34–37. **10.** Ковальский Б. С. Вопросы передвижения мостовых кранов. Луганск : ВГУ, 1998. 39 с. **11.** Гоберман Л. А., Степанян К. В., Яркин А. А., Зеленский В. С. Теория, конструкция и расчёт строительных и дорожных машин. М. : Машиностроение, 1979. 407 с.

REFERENCES:

1. Gorskiy B. E., Loveykin V. S. Metodika sostavleniya operatorov peredachi dvijeniya. Gornyye, stroitelnyie i dorojnyie mashinyi. K. : Tekhnika, 1979. Vyp. 28. S. 99–105. **2.** Loveykin V. S. Raschetyi optimalnih rejimov dvijeniya mehanizmov stroitelnyih mashin. K. : UMK VO, 1990. 168 s. **3.** Loveikin V. S., Nazarenko I. I., Onyshchenko O. H. Teoriia mekhanichnykh system. Kyiv-Poltava : IZMN-PDTU, 1998. 175 s. **4.** Zubko N. F. Prognozirovanie koeffitsientov dinamichnosti v elementah kranovyih mehanizmov. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*. 2013. № 2(38). S. 63–71. **5.** Komarov M. S. Dinamika gruzopodyemnyih mashin. K.– M. : Mashgiz, 1969. 267 s. **6.** Kazak S. A. Dinamika mostovyih kranov. M. : Mashinostroenie, 1968. 332 s. **7.** Lobov N. A. Dinamika peredvijeniya kranov po relsovomu puti. M. : MGTU, 2003. 232 s. **8.** Gaydamaka V. F. Gruzopodyemnyie mashinyi. K. : Vyshcha shkola, 1989. 208 s. **9.** Slepuzhnikov Ye. D. Vyznachennia dynamicnykh navantazhen pry peresuvanni vantazhnoho vizka mostovoho kрана. *Mashynobuduvannia*. 2015. № 16. S. 34–37. **10.** Kovalskiy B. S. Voprosyi peredvijeniya mostovyih kranov. Lugansk : VGU, 1998. 39 s. **11.** Goberman L. A., Stepanyan K. V., Yarkin A. A., Zalenskiy V. S. Teoriya, konstruktsiya i raschet stroitelnyih i dorojnyih mashin. M. : Mashinostroenie, 1979. 407 s.

Chovniuk Y. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Cherednichenko P. P., Associate Professor, Zolotar L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Shudra N. S., Senior Lecturer (Kyiv National University of Construction and Architecture)

ANALYSIS AND OPTIMIZATION (MINIMIZATION) OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF HOISTING MECHANISM OF URBAN CRANES

In the paper, a simplified dynamic model of mechanical system, namely, the hoisting mechanism of a crane has been developed. To determine the dynamic loads in the elastic rope is used approach, proposed by Professor Loveykin V.S. et al, when using a dynamic model in which all sectors are considered rigid, and only rope – the elastic. In this case the masses of the motor rotor, brake pulley, cogwheels, drum and load are brought to the branches of the rope, which are wound onto the drum of the hoisting mechanism of the city crane. The reduction of masses and moments of inertia of bodies of a given mechanical system is based on equality of kinetic energy of the given and reduced systems; the reduction of forces and moments – on equality of works (capacities), which these forces and moments perform and their reduced values; the reduction of stiffnesses – on equality of potential energies, which have elastic elements of the given and reduced systems. The reduction of masses, acting forces and stiffnesses is done to the branches of the rope wound on the drum for the hoisting mechanism of the city crane. Since this work poses the problem of a scientifically based determination of the dynamic loads in the rope strands during the start-up period (with various hoisting methods: "from the base" / "with a pick up" or "from the weight"), the reduction is made from two sides. All elements from the motor to the drum are brought to the upper part of the rope and the load and the rope are brought to the lower part.

Using specially introduced in the work criterion of quality of motion when lifting loads, which minimizes during the start-up period of the given mechanical system, dynamic loads in the elastic element (rope) are determined by using the apparatus of classical variational calculus, the conditions (Euler – Poisson equations) under which this criterion can be realized. Analytical relations determining time dependence of dynamic rope loads which gain minimum values during load lifting mechanism start-up are obtained. At the same time in initial and final conditions (so-called terminal conditions) peculiarities

of cargo lifting by different ways ("with weight", "from base"/"with pick up") are taken into account.

The dependencies and laws of motion of the cargo and the reduced mass of the "motor-drum" system can be further used to clarify and improve the existing engineering methods for calculating such mechanical systems, both in their design and in modes of actual operation.

***Keywords:* analysis; dynamic optimisation; load minimisation; elastic ropes; hoisting mechanism; lowering; lifting "with weight"; lifting "from the base"/"with pick-up"; urban cranes.**
