УДК 621.01: 621.87

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ ПРИ ПІДЙОМІ ТА ОПУСКАННІ ВАНТАЖУ НА ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ

В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, доктори технічних наук
В. А. Голдун, здобувач*
Національний університет біоресурсів і природокористування України
e-mail: lovvs@ukr.net

Анотація. *На основі багатоетапної математичної моделі системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб" виконана постановка оптимізаційної задачі. У задачі використано декілька критеріїв: інтегральний та термінальні. Інтегральний критерій відображає енергетичні та динамічні небажані характеристики системи, які нелінійно залежать від її узагальнених координат. Показано, що вибором крайових умов руху можна досягти абсолютних мінімумів термінальних критеріїв. Встановлено, що за умовою Лежандра інтегральний критерій може досягати мінімуму. Аналіз поставленої оптимізаційної задачі показав, що необхідно розв'язати нелінійне рівняння Ейлера-Пуассона. У роботі запропоновано знайти наближений розв'язок задачі використовуючи метод коллокацій. В якості базисної функції, на якій шукається наближений розв'язок задачі, використаний поліном, що задовольняє крайові умови руху системи та містить вільний параметр. У роботі було знайдено значення вільного параметра, для чого вихідна задача зведена до кубічного алгебраїчного рівняння. Його розв'язок знайдено методом Кардано. Знайдений наближений розв'язок оптимізаційної задачі дозволив отримати залежності, які описують енергетичні, динамічні на кінематичні функції системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб". Вони характеризуються плавністю зміни у часі, що покращує ефективність експлуатації вантажопідйомної машини*.

Ключові слова: ***транспортний засіб, вантажопідйомний кран, оптимальне керування, динамічні навантаження***

Постановка проблеми. Прольотні крани (мостові та козлові) отримали значне поширення у металургії, машинобудуванні, легкій

***Науковий керівник – доктор технічних наук В. С. Ловейкін**

промисловості, сільському та лісовому господарстві, будівництві. При виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт у випадку сумісної роботи прольотного крана та транспортного засобу у обох машинах виникають значні динамічні навантаження. Вони додатково навантажують транспортний засіб і вантажопідйомний кран, що є небажаним оскільки знижується їх надійність.

Для того, щоб знизити небажані динамічні навантаження, що діють у механізмі підйому вантажу та підвісці транспортного засобу, необхідно певним чином керувати посадкою та підйомом вантажу. Одним із раціональних шляхів вирішення цієї задачі є застосування оптимального керування механізмом підйому вантажу.

Аналіз останніх досліджень. На даний час відома значна кількість наукових робіт, які присвячені динамічним розрахункам механізму підйому мостових, козлових стрілових та інших кранів. Серед них необхідно виділити роботи М. С. Комарова [1], М. А. Лобова [2], С. А. Казака [3], В. Ф. Гайдамаки [4], М. М. Гохберга [5], Л. Я. Будікова [6], О. С. Подоляка [7], Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan [8].

Аналіз цих робіт з динаміки підйому/опускання вантажу показує, що існує декілька напрямків зі зниження динамічних навантажень у елементах крана (рис. 1).

Рис. 1. Заходи направлені на зменшення динамічних навантажень у елементах механізму підйому вантажу.

Заходи, які стосуються вибору динамічних параметрів системи, а також її конструктивних особливостей реалізуються при проектуванні конструкції крана та його окремих механізмів, а також при його модернізації (наприклад, у випадку необхідності подовження ресурсу).

Забезпечити суперечливі вимоги щодо значної продуктивності навантажувально-розвантажувальних робіт і зниження динамічних навантажень у елементах крана і транспортного засобу можливо на основі оптимізації перехідних режимів руху цієї системи. Це не викликає значних капітальних витрат при реалізації оптимального керування на практиці, оскільки сучасні системи керування роботою крановими механізмами досить гнучко програмуються.

Роботи, які присвячені питанням оптимізації режимів руху механізму підйому вантажу, виконані багатьма вченими. Зокрема, в роботі [9] досліджено динаміку багатомасових систем з електроприводом. На основі проведених досліджень авторами встановлено оптимальне значення жорсткості механічної характеристики електроприводу, за якого відбувається максимальне демпфування пружних коливань у системі. У книзі [10] для механізму підйому вантажу знайдені оптимальні закони руху. Результати, що отримані у цій роботі, враховують обмеження на кінематичні, силові та динамічні характеристики механізму підйому вантажу. Однак, оптимізація режимів руху повинна включати декілька небажаних факторів (силові, енергетичні тощо), які, як правило, приводять до необхідності розв'язання нелінійних оптимізаційних задач.

Метою досліджень є синтез оптимального керування рухом системи „вантажопідйомний кран – вантаж – транспортний засіб", яке дозволяє мінімізувати енерговитрати та динамічні навантаження у елементах механізму підйому вантажу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: на основі математичної моделі руху досліджуваної системи обґрунтувати вибір оптимізаційних критеріїв; виконати постановку та аналіз задачі оптимального керування рухом системою; знайти розв'язок задачі та вказати напрямки подальших досліджень.

Результати досліджень. У роботі [11] була розроблена математична модель системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб", яка ґрунтується на динамічній моделі (рис. 2). На рис. 2 наведені такі позначення: $c_{тз}$, $c_{к}$, $c_{м}$ – зведені коефіцієнти жорсткості транспортного засобу, вантажних канатів та моста крана відповідно; $b_{тз}$, $b_{к}$, $b_{м}$ – зведені коефіцієнти дисипації транспортного засобу, вантажних канатів та моста крана відповідно; $m_{тз}$, $m_{в}$, $m_{п}$, $m_{м}$ – зведені маси транспортного засобу, вантажу, приводну механізма підйому вантажу та кранового моста відповідно; $x_{тз}$, $x_{в}$, $x_{п}$, $x_{м}$ – узагальнені координати відповідних мас; $F_{п}$ – зведене до барабана зусилля приводу механізма підйому вантажу.

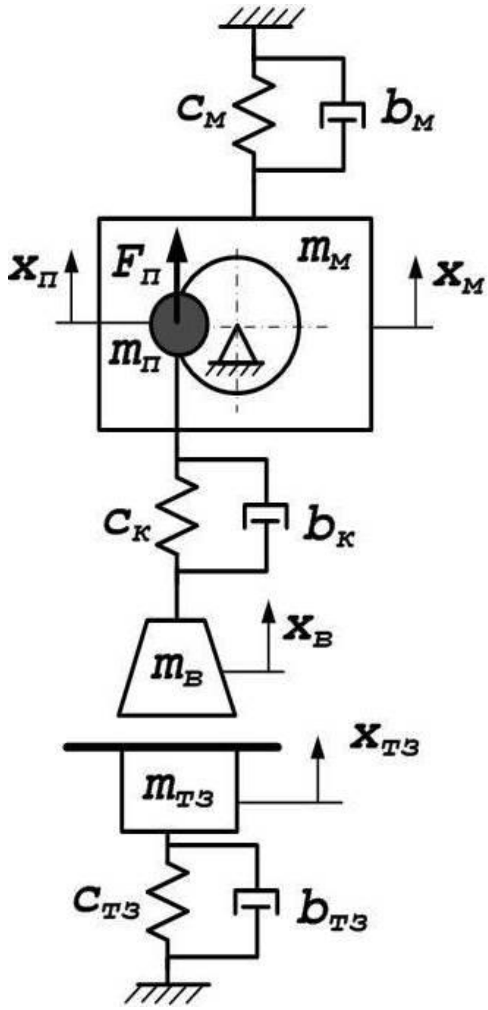

Рис. 2. Динамічна модель системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб”.

Математична модель системи є багатоетапною, це означає, що кінцеві умови для руху мас поточного етапу є початковими умовами для наступного. Коротко опишемо сутність етапів математичної моделі. Перший етап підйому вантажу триває поки йде вибірка зазорів у механічних передачах та усувається слабина канатів, тобто рухається лише зведена маса приводу. На другому етапі відбувається натяг каната до моменту коли зусилля натягу канату стане рівним вазі вантажу. На цьому етапі рухаються всі маси динамічної системи. На третьому етапі на вантаж вже не діє пружно-в'язке зусилля підвіски транспортного засобу – він рухається незалежно від коливань транспортного засобу. На четвертому етапі руху динамічної системи відбувається вимикання електродвигуна і накладання гальм, яке відбувається стрибкоподібно. Динаміка руху електроприводу описується уточненим рівнянням Клосса.

У [12] показано, що використання систем рівнянь, що описують рух тримасової динамічної моделі підйому механізму підйому вантажу на третьому етапі, не дозволяє провести оптимізацію, оскільки при цьому не забезпечуються кінцеві умови руху окремих зосереджених мас. У практичному плані це може викликати коливання вантажу на канаті та кранового моста, що за умовами задачі є неприпустимим. Тому для проведення оптимізації режимів підйому/опускання вантажу було запропоновано використовувати систему з двох диференціальних рівнянь другого порядку, що описують рух зведених мас механізму та вантажу [13]:

$$\begin{cases} m_п \ddot{x}_п + c_к(x_п - x_в) = F_п - W; \\ c_к(x_п - x_в) = m_в(\ddot{x}_в + g). \end{cases} \quad (1)$$

Модель (1) справедлива для умови значної жорсткості кранової балки, або для випадку коли підйом/опускання вантажу виконується біля однієї з опор крана. Крім того, у моделі (1) не враховані дисипативні характеристики системи, що не вносить значних похибок у розрахунки.

Для проведення оптимізації необхідно також задати крайові умови руху системи. У загальному вигляді вони записуються так:

$$\begin{cases} x_n(t_i) = x_{n.t_i},\ \dot{x}_n(t_i) = v_{t_i},\ x_в(t_i) = x_{в.t_i},\ \dot{x}_в(t_i) = v_{t_i}; \\ x_n(t_{i+1}) = x_{n.t_i} + s,\ \dot{x}_n(t_{i+1}) = v_{t_{i+1}};\ x_в(t_{i+1}) = x_{в.t_i} + s,\ \dot{x}_в(t_i) = v_{t_{i+1}}, \end{cases} \tag{2}$$

де: $x_{n.t_i}$ та $x_{n.t_{i+1}}$ – положення зведеної маси приводу на початку та у кінці *i*-того етапу; де $x_{в.t_i}$ – положення зведеної маси вантажу на початку *i*-того етапу (за умови відсутності коливного руху зведеної маси вантажу її положення на величину $\frac{m_в g}{c_к}$ більше, ніж положення зведеної маси приводу). Це випливає, того, що на вантаж діє сила ваги, яка спричиняє розтяг канату на величину $\frac{m_в g}{c_к}$; v_{t_i} та $v_{t_{i+1}}$ – швидкість зведених мас приводу та вантажу на початку і у кінці *i*-того етапу відповідно; *s* – переміщення зведених мас приводу та вантажу у кінці *i*-того етапу.

Рівність швидкостей зведених мас приводу та вантажу на початку етапу випливає з припущення, що вони не виконують коливний рух: на початку третього етапу зведені маси вантажу та приводу рухаються на посадочній швидкості досягнення якої не супроводжується значимими перехідними процесами і вони швидко затухають. Для четвертого етапу режиму підйому вантажу зведені маси рухаються з номінальною швидкістю і коливні процеси відсутні, оскільки кінцеві умови руху цих мас на третьому етапі забезпечують відсутність коливань зведених мас.

Аналогічні викладки можна зробити і для режиму опускання вантажу: на початку першого етапу зведені маси мають нульову швидкість; на етапі переходу до посадочної швидкості коливання зведеної маси вантажу відносно зведеної маси приводу відсутні.

Для проведення оптимізації виберемо оптимізаційний критерій:

$$I = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left(P_n^2 \delta_1 + F_к^2 \delta_2\right) dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left((F_n \dot{x}_n)^2 \delta_1 + (c_к (x_n - x_в))^2 \delta_2\right) dt \to \min, \tag{3}$$

де: $P_п$ – потужність приводного двигуна; $F_к$ – зусилля натягу канату; δ_1 та δ_2 – коефіцієнти, які визначаються з наступних залежностей:

$$\begin{cases} \delta_1 = \dfrac{k_1}{P_{ном}^2}; \\ \delta_2 = \dfrac{k_2}{m_в^2 g^2}, \end{cases} \tag{4}$$

де: $P_{ном}$ – номінальна потужність приводу механізму підйому вантажу; k_1 та k_2 – безрозмірні вагові коефіцієнти, які визначають важливість тієї чи іншої складової критерію (3), і які пов'язані залежністю: $k_1 + k_2 = 1$. Вирази (4) дозволяють зводити одиничні критерії (квадрати потужності приводного двигуна та зусилля натягу канату) до безрозмірних величин. Це, у свою чергу, дає змогу сформувати інтегральний критерій (3), за яким можна провести комплексну оптимізацію перехідних режимів руху механізму підйому вантажу.

Для проведення оптимізації обрано саме дві величини: потужність приводного двигуна та зусилля натягу канату. Вони входять у вираз критерію (3) у безрозмірних формах. Вибір саме цих величин для проведення оптимізації перехідних режимів руху механізму підйому вантажу випливає з їх важливості: перша величина дозволяє зменшити потужність двигуна у перехідних режимах і таким чином підвищити енергоефективність роботи крана, а друга – знизити динамічні навантаження у канаті, що збільшує довговічність його роботи. При розв'язуванні задачі отримаємо вираз, який буде містити коефіцієнти k_1 і k_2. Зміною їх значень можна забезпечити ті чи інші вимоги до режимів руху механізму підйому вантажу, які, як правило, є суперечливими. Числові величин вагових коефіцієнтів k_1 і k_2 встановлюються за допомогою різноманітних методів, наприклад, за допомогою методу експертних оцінок. Крім інтегрального критерію (3) поставимо також термінальні критерії [14], які виражаються такими залежностями:

$$\begin{cases} F_n^2(t_i) \to \min \ ; \\ \dot{F}_n^2(t_i) \to \min \ ; \\ F_n^2(t_{i+1}) \to \min ; \\ \dot{F}_n^2(t_{i+1}) \to \min \ . \end{cases} \tag{5}$$

Мінімізація термінальних критеріїв (5) дозволяє усунути удари у кінематичних зачепленнях приводу, що підвищує їх надійність та довговічність. Таким чином, оптимізаційна задача (1)-(5) поставлена. Для того, щоб привести її до зручного для розв'язування вигляду проведемо певні перетворення. З виразу (3) видно, що необхідно шукати дві невідомі функції, які описують положення вантажу та приводу. Однак, ці функції зв'язані між собою другим рівнянням системи (1). Таким чином, функцію положення приводу можна виразити через функцію положення вантажу та її другу похідну за часом:

$$x_n = x_в + \frac{m_в}{c_к}(\ddot{x}_в + g). \tag{6}$$

Можна у загальному вигляді записати вищі похідні виразу $x_п$ за часом:

$$\overset{j}{x}_п = \overset{j}{x}_в + \frac{m_в}{c_к}\overset{j+2}{x}_в, \tag{7}$$

де: j – індекс, що позначає порядок похідної виразу $x_п$.

Враховуючи вирази (6) та (7), можемо переписати вираз функціоналу (1) у наступному вигляді:

$$I = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left(\left(((\ddot{x}_в + \frac{m_в}{c_к}\overset{IV}{x}_в)m_п + m_в(\ddot{x}_в + g))(\dot{x}_в + \frac{m_в}{c_к}\dddot{x}_в) \right)^2 \delta_1 + m_в^2 (g + \ddot{x}_в)^2 \delta_2 \right) dt \to \min . \tag{8}$$

Аналогічно, можна переписати вирази термінальних критеріїв:

$$\begin{cases} (\ddot{x}_в(t_i) + \frac{m_в}{c_к}\overset{IV}{x}_в(t_i))m_п + m_в(\ddot{x}_в(t_i) + g))^2 \to \min ; \\ (\dddot{x}_в(t_i) + \frac{m_в}{c_к}\overset{V}{x}_в(t_i))m_п + m_в(\dddot{x}_в(t_i) + g))^2 \to \min ; \\ (\ddot{x}_в(t_{i+1}) + \frac{m_в}{c_к}\overset{IV}{x}_в(t_{i+1}))m_п + m_в(\ddot{x}_в(t_{i+1}) + g))^2 \to \min; \\ (\dddot{x}_в(t_{i+1}) + \frac{m_в}{c_к}\overset{V}{x}_в(t_{i+1}))m_п + m_в(\dddot{x}_в(t_{i+1}) + g))^2 \to \min . \end{cases} \tag{9}$$

Також, з урахуванням формул (6) та (7) запишемо крайові умови руху системи (2):

$$\begin{cases} x_в(t_i) = x_{в.t_i}, \;\; \dot{x}_в(t_i) = v_{t_i}, \;\; \ddot{x}_в(t_i) = 0, \;\; \dddot{x}_в(t_i) = 0 \, ; \\ x_в(t_{i+1}) = x_{в.t_i} + s, \;\; \dot{x}_в(t_{i+1}) = v_{t_{i+1}}, \;\; \ddot{x}_в(t_{i+1}) = 0, \;\; \dddot{x}_в(t_{i+1}) = 0. \end{cases} \tag{10}$$

Таким чином, виконані перетворення дозволили звести оптимізаційну задачу до відшукування лише однієї невідомої функції $x_в$. Це значно спрощує оптимізаційну задачу.

Для встановлення типу екстремуму, який може досягатися на критерії (8), використаємо умову Лежандра [15]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \overset{IV}{x}_в{}^2} = \left(\sqrt{2\delta_1} c^{-1} m_в m_п (\dot{x}_в + \frac{m_в}{c_к}\dddot{x}_в) \right)^2 > 0. \tag{11}$$

де: V – підінтегральний вираз критерію (8). Додатність виразу (11) означає, що критерій (8) може набувати мінімуму.

Оцінимо можливості використання варіаційного числення [15] для розв’язування поставленої задачі. Для цього запишемо необхідну умову мінімуму критерію (3) – рівняння Ейлера-Пуассона. Формально його можна подати у наступному вигляді:

$$\sum_{r=1}^{4} (-1)^r \frac{d^r}{dt^r} \frac{\partial^r V}{d \overset{r}{x}_в} = f(\overset{2r}{x}_в) = 0. \tag{12}$$

Рівняння (12) у розгорнутому вигляді має значний об'єм, крім того, воно є нелінійним. Це означає, що знайти розв'язок цього рівняння у аналітичному вигляді неможливо. Задача ускладнюється тим, що на шуканій екстремалі необхідно забезпечити мінімуми термінальним критеріям (9).

Використання принципу максимуму та динамічного програмування не дає суттєвих переваг в плані зниження складності розв'язування оптимізаційної задачі. Тому обхідно використати один з прямих варіаційних методів, які дають змогу знайти наближений розв'язок задачі.

Для розв'язування задачі застосуємо метод коллокацій, який успішно використовується для розв'язування подібних задач [16]. У відповідності до цього методу виберемо базисну функцію, яка забезпечує крайові умови (10).

Крім того, для забезпечення абсолютних мінімумів термінальних критеріїв (9) встановимо вимогу рівності нулю четвертої та п'ятої похідної функції $x_в$ за часом на початку та у кінці i-того етапу. Базисну функцію шукаємо у вигляді полінома. Для забезпечення наведених вимог сформуємо крайову задачу:

$$\begin{cases} \overset{XIII}{x}_в = 0, \\ \begin{cases} x_в(t_i) = x_{в.t_i},\ \dot{x}_в(t_i) = v_{t_i},\ \ddot{x}_в(t_i) = 0,\ \dddot{x}_в(t_i) = 0,\ \overset{IV}{x}_в(t_i) = 0,\ \overset{V}{x}_в(t_i) = 0\ ; \\ x_в\left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2}\right) = C_1; \\ x_в(t_{i+1}) = x_{n.t_i} + s,\ \dot{x}_в(t_{i+1}) = v_{t_{i+1}},\ \ddot{x}_в(t_{i+1}) = 0,\ \dddot{x}_в(t_{i+1}) = 0,\ \overset{IV}{x}_в(t_{i+1}) = 0,\ \overset{V}{x}_в(t_{i+1}) = 0, \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

де: C_1 – коефіцієнт, який дає змогу на функції-розв'язку крайової задачі (13) забезпечити розв'язок рівняння Ейлера-Пуассона (12) лише у момент часу $\frac{t_i + t_{i+1}}{2}$.

Згідно з методом коллокацій необхідно сформувати нев'язку диференціального рівняння (12). Це виконується шляхом підстановки вищих похідних функції-розв'язку крайової задачі (13) за часом включно до восьмого порядку у вираз (12). Знайдену нев'язку рівняння (12) необхідно наблизити до нуля. Це можливо виконати шляхом підбору коефіцієнта C_1. Для цього підставимо у вираз нев'язки замість символу часу t вираз $\frac{t_i + t_{i+1}}{2}$ і будемо вимагати рівність нулю нев'язки у даний момент часу. Це приводить до необхідності розв'язування кубічного рівняння:

$$aC_1^3 + bC_1^2 + cC_1 + d = 0, \tag{14}$$

де: *a*, *b*, *c* і *d* – коефіцієнти, які залежать від параметрів системи та режимних параметрів того чи іншого етапу підйому/опускання вантажу (вирази коефіцієнтів *a*, *b*, *c* і *d* значні за об'ємом, тому не наведені). Розв'язок рівняння (14) виконали за допомогою методу Кардано [17]. З трьох коренів алгебраїчного рівняння (14) оберемо один – той, який забезпечує фізичні умови руху системи. Знайдений корінь (тобто значення коефіцієнту C_1) має фізичний сенс це положення вантажу в момент часу $\frac{t_i + t_{i+1}}{2}$, при якому забезпечується мінімізація функціоналу (8). Таким чином, отримано наближений розв'язок варіаційної задачі (8)–(10). Для отриманого розв'язку побудуємо графіки (рис. 3) для параметрів вантажопідйомного крана: $c_к$=15,452·10^6 Н/м, $c_м$=10,844·10^6 Н/м, $b_к$= 25·10^3 Н·с/м, $b_м$= 10·10^3 Н·с/м, $m_п$=415520 кг, $m_м$=19300 кг, $m_в$=20000 кг.

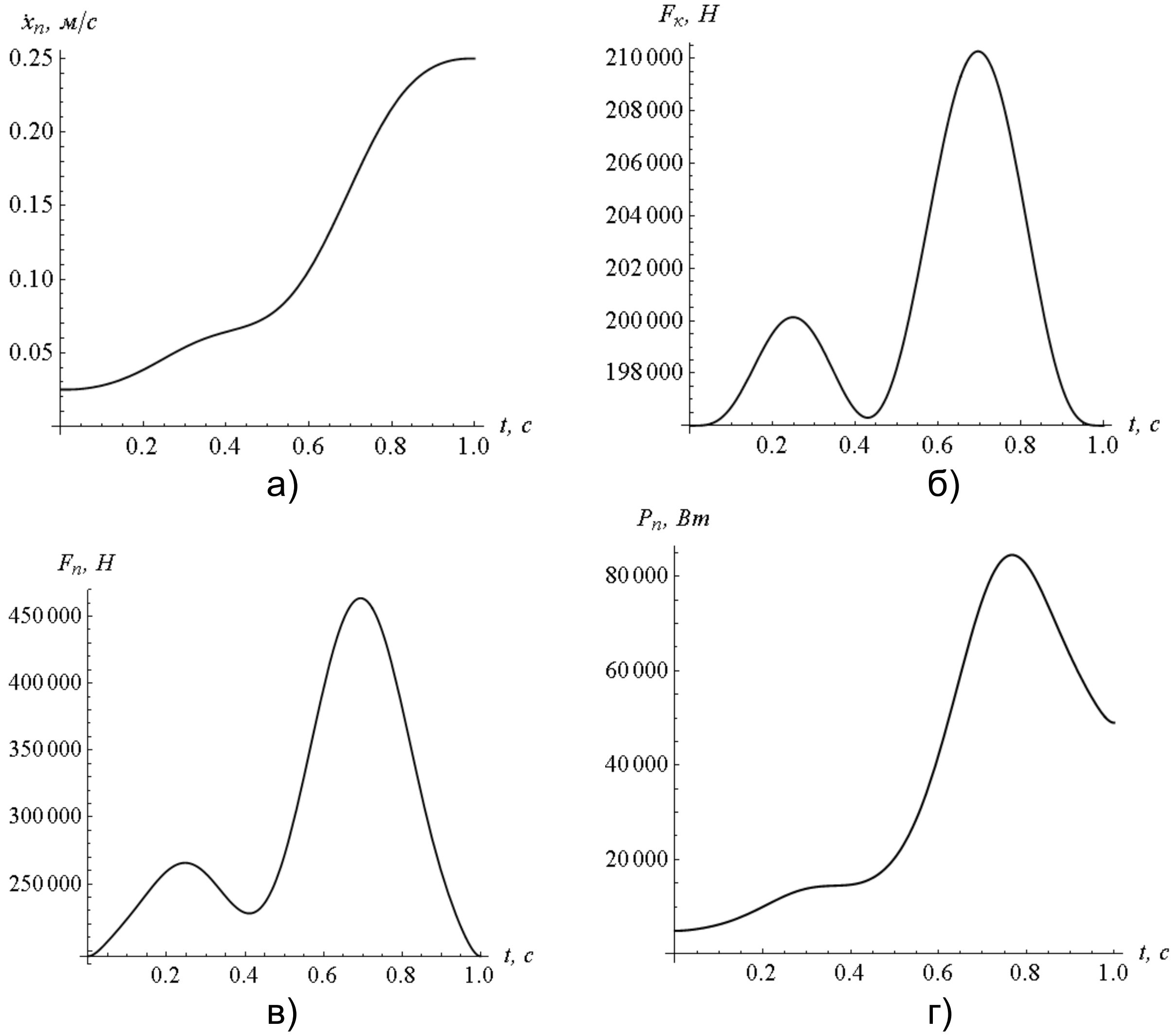

Рис. 3. Графіки функцій, які відповідають наближеному розв'язку оптимізаційної задачі: а) швидкість руху зведеної маси приводу; б) зведене зусилля у канаті; в) зведене приводне зусилля; г) потужність приводу.

Графічні залежності на рис. 3 побудовані для етапу переходу від посадочної (0,025 м/с) до номінальної (0,25 м/с) швидкості підйому вантажу, тобто для режиму підйому вантажу при умові, що вантаж вже відірвався від поверхні транспортного засобу (третій етап руху системи). Тривалість етапу обрана рівною 1 секунді.

З рис. 3 видно, що рух зведених мас вантажу та приводу має плавний характер. Це зумовлює зниження динамічних навантажень та не викликає суттєвих енерговитрат при реалізації оптимального режиму руху системи.

Висновки

У роботі виконано загальну постановку оптимізаційної задачі для багатоетапного процесу підйому/опускання вантажу. Вона включає нелінійні інтегральні та термінальні функціонали, які відображають небажані енергетичні та динамічні показники руху системи. Нелінійність оптимізаційних критеріїв не дає змогу знайти точні розв’язки поставлених задач.

За допомогою методу коллокацій знайдено наближений розв’язок оптимального керування рухом механізму підйому вантажу при зміні швидкості підйому/опускання вантажу. Задачу зведено до кубічного алгебраїчного рівняння, його розв’язок знайдено методом Кардано.

Отриманий наближений розв’язок вихідної оптимізаційної задачі описується неперервно-диференційованими функціями. У практичному плані це призводить до зниження динамічної навантаженості елементів приводу, металоконструкції крана та канату, а також зменшує небажані енергетичні втрати у приводному електродвигуні.

Список літератури

1. *Комаров М. С.* Динамика грузоподъемных машин. Москва. Машиностроение. 1969. 206 с.
2. *Лобов Н. А.* Динамика грузоподъемных кранов. Москва. Машиностроение. 1987. 160 с.
3. *Казак С. А.* Динамика мостовых кранов. Москва. Машиностроение. 1968. 331 с.
4. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины. Киев. Вища школа. 1989. 328 с.
5. *Гохберг М. М.* Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Москва. Машиностроение, 1969. 520 с.
6. *Будиков Л. Я.* Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа. Луганск. Изд-во ВУГУ. 1997. 210 с.
7. *Подоляк О. С.* Исследование динамических нагрузок при подъеме груза с жесткого основания автомобильным краном. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2009. №1/5(37). С. 43—47.
8. *Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan.* Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane. Procedia Engineering. 2011. №16. P. 586—593.

9. *Герасимяк Р. П., Лещёв В. А.* Анализ и синтез крановых электромеханических систем. Одесса. СМИЛ. 2008. 192 с.
10. *Ловейкін В. С., Нестеров А. П.* Динамічна оптимізація підйомних машин. Харків. ХДАДТУ. 2002. 285 с.
11. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Голдун В. А.* Математическое моделирование системы „механизм подъема груза – груз – транспортное средство" // Motrol. 2014. Vol 16. No 3. Lublin. P. 103—109.
12. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О.* Динаміка і оптимізація режимів руху мостових кранів: монографія. Київ. Компрінт. 2016. 314 с.
13. *Ловейкін В. С., Голдун В. А.* Оптимізація режиму підйому вантажу з транспортного засобу. 75 науково-практична конференція Київського національного університету будівництва і архітектури. м. Київ. 15-18 квітня 2014 року: тези доповідей. Київ. 2014. С. 28—30.
14. *Ловейкін В. С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Киев. УМК ВО. 1990. 168 с.
15. *Петров Ю. П.* Вариационные методы теории оптимального управления. Ленинград. Энергия. 1977. 280 с.
16. *Вербжицкий В. М.* Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). Москва. Директ-Медиа. 2013. 400 с.
17. *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике. Москва. Наука. 1977. 872 с.

References

1. *Komarov M. S.* (1969). Dynamics of lifting machines. Engineering. 206.
2. *Lobov N. A.* (1987). Dynamics of cranes. Engineering. 160.
3. *Kazak S. A.* (1968). Dynamics of bridge cranes. Engineering. 331.
4. *Haidamaka V. F.* (1989). Lifting machines. Highest school. 328.
5. *Gohberg M. M.* (1969). Metal constructions of load-lifting machines. Engineering. 520.
6. *Budikov L. Ya.* (1997). Multivariable analysis of the dynamics of the bridge-type cranes. VUGU. 210.
7. *Podoliak O. S.* (2009). Research of dynamic loads when lifting oad from rigid base by car crane. East-European magazine of advance technologies. №1/5(37). 43–47.
8. *Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan.* (2011). Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane. Procedia Engineering. №16. 586–593.
9. *Gerasimyak R. P., Leschev V. A.* (2008). Analysis and synthesis of crane electromechanical systems. SMIL. 192.
10. *Loveikin V. S.* (2002). Dynamic optimization of lifting machines. KhDADTU. 285.
11. *Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Holdun V. A.* (2014). Mathematical modeling of the system „the mechanism of lifting a load - a cargo - a vehicle". Motrol. Vol. 16. No 3. 103–109.
12. *Loveikin V. S., Romasevych Yu. O.* (2016). Dynamics and optimization of traffic overhead cranes. TsP KOMPRINT. 314.
13. *Loveikin V. S., Holdun V. A.* (2014). Optimization of the mode of lifting of load from a vehicle. A collection of abstracts 75 scientific conference Kyiv National University of Constructing and Architecture. 15-18 April 2014. 28–30.
14. *Loveikin V. S.* (1990). Calculation of optimal modes of construction machines mechanisms movement. UMK VO. 168.

15. *Petrov Ju. P.* (1977). Variational methods of optimal control theory. Energy. 280.
16. *Verbzhytskyi V. M.* (2013). Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations). Dyrekt-Medya. 400.
17. *Vyhodskyi M. Ya.* (1977). Handbook on advanced mathematics. Science. 872.

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПОДЪЕМА ГРУЗА ПРИ ПОДЪЕМЕ И ОПУСКАНИИ ГРУЗА НА ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО

В. С. Ловейкин, Ю. А. Ромасевич, В. А. Голдун

Аннотация. *На основе многоэтапной математической модели системы „механизм подъема груза - груз - транспортное средство” выполнена постановка оптимизационной задачи. В задачи использовано несколько критериев: интегральный и терминальные. Интегральный критерий отображает энергетические и динамические нежелательные характеристики системы, которые нелинейно зависят от ее обобщенных координат. Показано, что выбором краевых условий движения можно достичь абсолютных минимумов терминальных критериев. Установлено, что по условию Лежандра интегральный критерий может достигать минимума. Анализ поставленной оптимизационной задачи показал, что необходимо решить нелинейное уравнение Эйлера-Пуассона. В работе предложено найти приближенное решение задачи используя метод коллокации. В качестве базисной функции, на которой ищется приближенное решение задачи, использован полином, который удовлетворяет краевым условиям движения системы и содержит свободный параметр. В работе было найдено значение свободного параметра, для чего исходная задача сведена к решению кубического алгебраического уравнения. Его решение найдено методом Кардано. Найденное приближенное решение оптимизационной задачи позволило получить зависимости, описывающие энергетические, динамические на кинематические функции системы „механизм подъема груза – груз – транспортное средство”. Они характеризуются плавностью изменения во времени, что улучшает эффективность эксплуатации грузоподъемной машины*.

Ключевые слова: ***транспортное средство, грузоподъемный кран, оптимальное управление, динамические нагрузки***

OPTIMIZATION OF CONTROL MECHANISM OF LIFTING LOAD WHEN LIFTING AND LOWERING LOAD ON VEHICLE

V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych, V. A. Holdun

Abstract. *On the basis of a multi-stage mathematical model of the system „the mechanism of lifting a load – a load – a vehicle” optimization* *problem has been stated. Several criteria are used in the task: integral and terminal. The integral criterion reflects the energy and dynamic undesirable characteristics of the system, which nonlinearly depend on its generalized coordinates. It has been shown that by choosing the boundary conditions of motion it is possible to achieve absolute minima of the terminal criteria. It has been established that under the Legendre condition an integral criterion may reach a minimum. An analysis of the optimization problem has shown that the nonlinear Euler-Poisson equation must be solved in order to find the solution. In order to find approximate solution of the problem the collocation method was suggested to use. A polynomial which satisfies the boundary conditions of the system's motion and contains a free parameter has been used as the basis function for an approximate solution of the problem. In the article the value of the free parameter has been found, so the original problem has been reduced to the solution of the cubic algebraic equation. Its solution was found by the Cardano's method. The approximate solution of the optimization problem allowed to obtain dependences witch describe the energy, dynamical on the kinematic functions of the system „the mechanism of lifting a load - a load - a vehicle”. They are characterized by smoothness of changes in time, which improves the operation efficiency of the lifting machine.*

Key words: ***vehicle, crane, optimal control, dynamic loads***

УДК 631.31:64

ШТУЧНІ КОГНІТИВНІ СИСТЕМИ В ПРОЦЕСАХ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Д. Ю. Калініченко, здобувач*
І. Л. Роговський, кандидат технічних наук
e-mail: irogovskii@gmail.com

Анотація. *В основі технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів за технічним станом лежить технічний контроль, за допомогою якого проводять безперервний або періодичний контроль параметрів технічного стану, що характеризують поточний фактичний стан вузлів, механізмів чи аграгатів. Прогнозування виконують при безперервному контролі для визначення наробітку, протягом якого збережеться*

***Науковий керівник – кандидат технічних наук І. Л. Роговський**