DOI: 10.31548/machenergy.2020.02.005-013

УДК 621.87

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЗМІНИ ВИЛЬОТУ СТРІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА

В. С. Ловейкін¹, Ю. О. Ромасевич¹, О. О. Сподоба¹, А. В. Ловейкін², С. А. Шворов¹

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна. ²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net.

Історія статті: отримано – січень 2019, акцептовано – квітень 2020. Бібл. 16, рис. 7, табл. 0.

Анотація. У статті представлено метод вирішення проблеми усунення коливань вантажу на шарнірному підвісі під час одночасного переміщення двох ланок стрілової системи, а саме підйому рукояті та зменшення вильоту телескопічної секції. Суть методу полягає в оптимізації режиму одночасного переміщення двох ланок стрілової системи кранаманіпулятора при горизонтальному переміщені вантажу в період пуску.

За критерій оптимізації обрано комплексній інтегральний критерій, який відносним £ значенням зусиль середньоквадратичним та потужностей приводних гідроциліндрах. В Розроблений критерій відображає небажані властивості ланок стрілової системи та механізмів приводу, тому його значення зводилися до мінімуму.

Оскільки критерій оптимізації є інтегральним функціоналом, то для його оптимізації використані методи варіаційного числення. Рішення варіаційної задачі оптимізації представлено у вигляді багато параметричних функцій, які задовольняють крайові умови руху та мінімізують комплексний безрозмірний критерій. Для цієї мети був використаний метод оптимізації рою частинок (ME-PSO). Це дало отримати залежності оптимальних можливість енергетичних та силових характеристик стрілової системи та механізмів приводу крана-маніпулятора. Отриманий результаті оптимізації В режим переміщення ланок стрілової системи покращив силові та енергетичні характеристики крана-маніпулятора, що дало можливість підвищити його надійність та продуктивність.

Ключові слова: кран-маніпулятор, оптимізація, динамічні навантаження, критерій, коливання вантажу.

Постановка проблеми

Під час зміни вильоту стрілової системи кранаманіпулятора в елементах металоконструкції та приводних механізмах виникають значні динамічні навантаження, які знижують його надійність та продуктивність виконання навантажувальних та розвантажувальних операцій. Однією з основних причин виникнення динамічних навантажень є розгойдування вантажу закріпленого на шарнірному підвісі під час пуску приводних гідроциліндрів, яке, в свою чергу, суттєво залежить від характеру зміни рушійних зусиль в приводних гідроциліндрах [1]. Задача досліджень полягає в тому, щоб знайти такі закони зміни рушійних сил, при яких коливання вантажу на шарнірному підвісі були б мінімальними.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз літературних джерел [1–6] з динаміки руху маніпуляторів показує, що поставлена науковотехнічна проблема вирішувалась і раніше, однак в повній мірі досягти усунення коливань вантажу не вдалося. В роботах [7–9] наведені результати останніх досліджень розробки та впровадження прикладних методів оптимізації, питань формалізації, класифікації оцінки складності обчислювальних залач та оптимізації. Підтверджено, що методи оптимізації можуть використовуватися для вирішення широкого кола прикладних проблем, що виникають у науці, техніці, біології, економіці, виробництві тощо. Оптимізація природними (біологічними) методами набуває широкого поширення в різних областях людської діяльності [8].

Одним із методів, який може бути застосований для вирішення проблеми оптимізації режиму руху стрілової системи крана-маніпулятора, є метод рою частинок (PSO) [9]. В роботі [10] автори проаналізували генетичний алгоритм PSO та нейронгенетичний метод вирішення проблеми оптимізації. Метод PSO використовується для обчислення різних задач управління, розробки штучних нейронних мереж, сигналів процесу тощо [9–14].

В роботах [15, 16] запропоновано новий метод, заснований на технології оптимізації рою частинок. Основна ідея полягає у відновленні рою із низькою ефективністю інтелекту. Використання ройових технологій, методу PSO або інших подібних методів та їх модифікацій дає можливість розробляти методи оптимізації режимів руху нелінійних механічних систем.

Поставлену задачу усунення коливань вантажу на шарнірному підвісі за рахунок вибору законів зміни рушійних зусиль в приводних гідроциліндрах кранаманіпулятора пропонується розв'язувати методами оптимізації з використанням PSO технологій.

Мета досліджень

Метою даних досліджень є усунення коливань вантажу на шарнірному підвісі шляхом оптимізації режиму зміни вильоту стрілової системи кранаманіпулятора за одночасного кутового переміщення рукояті та лінійного переміщення телескопічної секції при горизонтальному переміщенні вантажу.

Результати досліджень

Для реалізації поставленої мети використано кран-маніпулятор, який складається зі стріли та

рукояті з телескопічною секцією, до якої підвішений на шарнірному підвісі вантаж. В процесі зміни вильоту системи крана-маніпулятора стрілової будемо вважати, що стріла є нерухомою, а вантаж змінює виліт тільки за рахунок підіймання рукояті та зменшення вильоту телескопічної секції. При цьому розглянемо випадок зміни вильоту стрілової системи кранаманіпулятора, при якому вантаж переміщується по горизонталі. Такий режим зміни вильоту забезпечує значну економію енергетичних витрат приводних механізмів стрілової системи крана-маніпулятора. Досягається цей режим зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора шляхом узгодженої одночасної роботи механізмів повороту рукояті та переміщення телескопічної секції.

В цьому випадку кран-маніпулятор представляємо як голономну механічну систему. Вважаємо, що ланки стрілової системи є абсолютно твердими тілами, окрім шарнірного підвісу, на якому вантаж здійснює коливання в площині зміни вильоту. Динамічна модель такої системи має дві ступені вільності і представлена на рис. 1.



Рис. 1. Динамічна модель зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора. **Fig. 1.** The dynamic model of change departure of boom system of the loader crane.

В динамічній моделі крана-маніпулятора наведеній на рис. 1 прийняті такі позначення: α - кут нахилу стріли до горизонту; a_1 - довжина між кріпленням привідного гідроциліндра керування рукояттю та важелем; c - довжина рукояті; d – довжина телескопічної секції; l – довжина шарнірного підвісу; θ - кут утворений геометричними параметрами стрілової системи крана-маніпулятора; β , ν - кутові координати повороту рукояті та відхилення вантажу від вертикалі; x_1, x_2, x, y_1, y_2, h - горизонтальні та вертикальні координати центрів мас та кінцевих точок ланок стрілової системи крана-маніпулятора; z, y - горизонтальна та вертикальна координати центра мас вантажу; U_1, U - відповідно довжини гідроциліндрів рукояті та телескопічної секції.

За узагальнені координати прийнятої моделі використані лінійні координати центра мас вантажу *z* та горизонтальної координати точки *A* телескопічної секції рукояті *x*. При цьому вертикальна координата точки *A* телескопічної секції завжди залишається постійною, тобто $y_A = h = const$. Ця умова є кінематичною умовою, яка накладає додаткову в'язь на кран-маніпулятор в процесі зміни вильоту стрілової системи. Тому система з трьома ступенями вільності за рахунок кінематичної в'язі перетворилась в систему з двома ступенями вільності.

Для складання рівнянь руху зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора, представленого динамічною моделлю на рис. 1, використаємо рівняння Лагранжа другого роду:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x - \frac{\partial \Pi}{\partial x}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial \Pi}{\partial z}, \end{cases}$$
(1)

де: *Т*, Π - відповідно кінетична та потенціальна енергія системи; Q_x - непотенціальна складова узагальненої сили, яка відповідає узагальненій координаті *x*.

Кінетична і потенціальна енергія системи визначаються наступними залежностями:

$$T = \frac{1}{2} (J_1 + J_2) \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{S}^2 + \frac{1}{2} m \dot{z}^2; \qquad (2)$$

$$II = (m_1 y_1 + m_2 y_2 + my)g,$$
 (3)

де: J_1 , J_2 - відповідно моменти інерції рукояті та телескопічної секції відносно осі її повороту; m_1, m_2, m - відповідно маси рукояті, телескопічної секції та вантажу; S - координата центра мас телескопічної секції рукояті в напрямку її висування; g - прискорення вільного падіння.

Непотенціальну складову узагальненої сили, що відповідає координаті *х* визначимо з умови рівності елементарних робіт:

$$Q_X \delta \mathbf{x} = F_1 \cdot \delta U_1 + F \cdot \delta U, \tag{4}$$

де: F_1, F - відповідно зусилля в гідроциліндрах переміщення рукояті та телескопічної секції; $\partial U_1, \partial U$ елементарні переміщення штоків гідроциліндрів відповідно рукояті та телескопічної секції, які визначаються наступними залежностями:

$$\delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial x} \, \delta x;$$

$$\delta U = \frac{\partial U}{\partial x} \, \delta x.$$
(5)

Після підстановки виразів (5) в рівняння (4) отримаємо:

$$Q_x = F_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + F \frac{\partial U}{\partial x}.$$
 (6)

Взявши необхідні похідні від виразів (2) і (3) і підставивши їх в систему (1) з урахуванням

залежностей
$$\dot{\beta} = \dot{x} \frac{\partial \beta}{\partial x}; \ \ddot{\beta} = \ddot{x} \frac{\partial \beta}{\partial x} + \dot{x}^2 \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2}; \ \dot{S} = \dot{x} \frac{\partial S}{\partial x};$$

$$\ddot{S} = \ddot{x} \frac{\partial S}{\partial x} + \dot{x}^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2},$$
 отримаємо систему

диференціальних рівнянь зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора з шарнірним підвісом вантажу:

$$\begin{cases} (J_1 + J_2) \cdot \left(\ddot{x} \frac{\partial \beta}{\partial x} + \dot{x}^2 \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial \beta}{\partial x} + m_2 \cdot \left(\ddot{x} \frac{\partial S}{\partial x} + \dot{x}^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \right) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = Q_x - \left(m_1 \frac{\partial y_1}{\partial x} + m_2 \frac{\partial y_2}{\partial x} + m_2 \frac$$

Виразимо координати β , *S*, *y*₁, *y*₂, *y*, *U*₁, *U* через узагальнені координати *x* і *z* та візьмемо їхні похідні по цих координатах:

$$S = h\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}} - \frac{d}{2}; \quad \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{x}{h\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}}};$$

$$\frac{\partial^{2}S}{\partial x^{2}} = \frac{1}{h\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}\right]^{\frac{3}{2}}};$$
(8)

$$\beta = \operatorname{ArcTan} \frac{x}{h}; \quad \frac{\partial \beta}{\partial x} = -\frac{1}{h \cdot \left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right]};$$

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} = \frac{2}{h^3} \frac{x}{h^3 \cdot \left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right]^2};$$
(9)

$$y = h \left(1 - \cos \frac{x - z}{h} \right); \quad \frac{\partial y}{\partial x} = \sin \frac{x - z}{h};$$

$$\frac{\partial y}{\partial z} = -\sin \frac{x - z}{h};$$
 (10)

$$y_{1} = \frac{h \cdot c}{2\sqrt{h^{2} + x^{2}}}; \quad \frac{\partial y_{1}}{\partial x} = -\frac{c \cdot h}{2} \cdot \frac{x}{\left(h^{2} + x^{2}\right)^{\frac{3}{2}}};$$
$$\frac{\partial^{2} y_{1}}{\partial x^{2}} = -\frac{c}{2 \cdot h^{2}} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{2}}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}\right]^{\frac{5}{2}}}; \quad (11)$$

$$y_{2} = h - \frac{d}{2\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}}};$$

$$\frac{\partial y_{2}}{\partial x} = \frac{d}{2h^{2}} \cdot \frac{x}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}\right]^{\frac{3}{2}}};$$

$$\frac{\partial^{2} y}{\partial x^{2}} = \frac{d}{2 \cdot h^{2}} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{2}}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}\right]^{\frac{5}{2}}};$$

$$(12)$$

$$U = h\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}} - d; \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{x}{h \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}}};$$

$$\frac{\partial^{2} U}{\partial x^{2}} = -\frac{1}{h\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^{2}\right]^{\frac{3}{2}}}.$$

$$(13)$$

Координату U₁знайдемо, виходячи з рис.1 з наступних залежностей:

$$U_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 - 2a_1b_1Cos \angle BDF};$$
(14)

де: $DF = b_1$ (Рис. 1).

Для визначення кута $\angle BDF$ розглянемо чотири ланковий механізм *ODFE* (рис. 1) і визначимо діагональ *DE*:

$$DE = \sqrt{d_1^2 + e_1^2 - 2d_1e_1Cos\angle DOE},$$
 (15)

де: $DO = d_1$, $EO = e_1$, (Рис. 1).

Визначимо кут ∠DOE (рис. 1):

$$\angle DOE = \pi + \alpha - \theta - \beta. \tag{16}$$

Підставивши вираз (16) в залежність (15), отримаємо:

$$DE = \sqrt{d_1^2 + e_1^2 - 2d_1e_1Cos(\beta + \theta - \alpha)}.$$
 (17)
3 теореми синусів маємо:

$$\frac{Sin\angle DOE}{DE} = \frac{Sin\angle ODE}{e_1}.$$
 (18)

Звідки знаходимо:

$$Sin \angle ODE = \frac{e_1 Sin(\beta + \theta - \alpha)}{\sqrt{d_1^2 + e_1^2 - 2d_1 e_1 Cos(\beta + \theta - \alpha)}}.$$
 (19)

Тоді:

$$\angle ODE = \operatorname{ArcSin} \frac{e_1 \operatorname{Sin}(\beta + \theta - \alpha)}{\sqrt{d_1^2 + e_1^2 - 2d_1 e_1 \operatorname{Cos}(\beta + \theta - \alpha)}}.$$
 (20)

Кут ∠*FDE* знайдемо з виразу:

$$c_1^2 = b_1^2 + DE^2 - 2 \cdot b_1 \cdot DE \cdot Cos \angle FDE, \quad (21)$$

де: $FE = c_1$, (Рис. 1).

Звідки отримаємо:

$$Cos \angle FDE = \frac{DE^2 + b_1 - c_1^2}{2b_1 DE}$$
. (22)

З останнього виразу маємо:

$$\angle FDE = \operatorname{ArcCos} \frac{DE^2 + b_1 - c_1^2}{2b_1 DE} .$$
⁽²³⁾

Склавши вирази (20) та (23), знайдемо величину кута $\angle ODF$:

$$\angle ODF = \angle ODE + \angle FDE$$
. (24)
Знайдемо кут $\angle BDF$:

$$\angle BDF = \pi - \angle ODF . \tag{25}$$

Підставивши вираз (25) в залежність (14) будемо мати:

$$U_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 - 2 \cdot a_1 \cdot b_1} \cdot Cos \angle ODF.$$
(26)

3 останнього рівняння системи (7) знаходимо:

$$x = z + \frac{h}{g}\ddot{z}; \qquad \dot{x} = \dot{z} + \frac{h}{g}\ddot{z}; \qquad \ddot{x} = \ddot{z} + \frac{h}{g}z^{IV}.$$
(27)

Використавши вирази (27), замінимо систему рівнянь (7) одним диференціальним рівнянням, яке представимо в наступному вигляді:

$$\left(\ddot{z} + \frac{h}{g} z^{IV}\right) \left\{ \left[(J_1 + J_2(U)) \right] \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} \right)^2 + m_2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left(\dot{z} + \frac{h}{g} \ddot{z} \right)^2 \left\{ \left[(J_1 + J_2(U)) \right] \times \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + m_1 \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial J_2}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial x} \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left(m_1 \frac{\partial y_1}{\partial x} + m_2 \frac{\partial y_2}{\partial x} \right) + m\ddot{z} = Q_x.$$

$$(28)$$

За критерій оптимізації режиму зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора оберемо безрозмірній комплексний критерій, який враховує дію силових навантажень та потужність приводних механізмів і має вигляд:

$$K = \left\{ \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \left[\delta \cdot \left(\frac{Q_x}{\overline{F}} \right)^2 + (1 - \delta) \cdot \left(\frac{Q_x \cdot \dot{x}}{\overline{P}} \right)^2 \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (29)$$

де: t - час; t_n - тривалість процесу пуску маніпулятора;

V - швидкість усталеного руху вантажу;. $\overline{F}, \overline{P}$ - мінімально можливі значення узагальненої сили та потужності приводних механізмів для переміщення вантажу; δ - ваговий коефіцієнт який враховує дію узагальненої сили.

Мінімально можливі значення узагальненої сили та потужності приводних механізмів визначаються з умови мінімуму середньоквадратичних значень функціоналів, що відображають тягове зусилля та потужність при горизонтальному переміщенні вантажу в процесі пуску і виражаються залежностями:

$$\overline{F} = \frac{mV}{t_n}; \qquad \overline{P} = \frac{mV^2}{2t_n}. \tag{30}$$

Отриманий критерій необхідно мінімізувати, оскільки він відображає витрати зведених рушійних зусиль та потужностей приводних механізмів рукояті та телескопічної секції. Разом з тим, аналітично мінімізувати критерій (29) та вибрати закони зміни координати z = z(t) та її похідних за часом не представляється можливим при крайових умовах процесу пуску маніпулятора:

$$\begin{cases} t = 0: \quad x = z = z_0, \quad \dot{x} = \dot{z} = 0; \\ t = t_n: \quad x = z = \frac{Vt_n}{2}, \quad \dot{x} = \dot{z} = V, \end{cases}$$
(31)

де: *z*₀ - початкове значення координати *z*.

Зведемо систему крайових умов (31) до координати *z* та її похідних за часом. Для цього використаємо залежності (27), в результаті чого отримаємо:

$$\begin{cases} t = 0: \quad z = z_0, \quad \dot{z} = 0, \quad \ddot{z} = 0, \quad \ddot{z} = 0; \\ t = t_n: \quad z = z_0 + \frac{Vt_n}{2}, \quad \dot{z} = V, \quad \ddot{z} = 0, \quad \ddot{z} = 0. \end{cases}$$
(32)

Для знаходження наближеного розв'язку оптимізаційної задачі (29), (32) використаємо підхід, сутність якого зводиться до задання класу багатопараметричних функцій, які б задовольняли крайові умови (32) та забезпечили б мінімум функціоналу (29). Клас багатопараметричних функцій, на яких будемо відшукувати наближений розв'язок оптимізаційної задачі, задається як розв'язок крайової задачі:

$$\begin{cases} L(z) = 0; \\ t = 0: z = z_0, \dot{z} = 0, \ \ddot{z} = 0, \ \ddot{z} = 0; \\ t = \frac{t_n}{2}: z = z_{t_n/2}, \ \dot{z} = \dot{z}_{t_n/2}; \\ t = t_n: z = z_0 + \frac{Vt_n}{2}, \ \dot{z} = V, \ \ddot{z} = 0, \ \ddot{z} = 0, \end{cases}$$
(33)

де L - оператор, який діє на функцію z(t). Розв'язок крайової задачі (33) містить два невідомих параметра $z_{t_n/2}$ та $\dot{z}_{t_n/2}$. Оператор L(z) у рамках данного дослідження приймемо у вигляді диференціального рівняння десятого порядку L(z) = z(t). Однак, у загальному випадку цей оператор може бути іншим. Його обґрунтування виходить за рамки даної роботи.

Розв'яжемо крайову задачу (33). Після цього сформуємо вираз функціонала (29):

$$Cr = Cr(z_{t_n/2}, \dot{z}_{t_n/2}, t_n),$$
 (34)

який представляється нелінійною функцією своїх аргументів. Для ефективного відшукування таких значень $z_{t_n/2}$ та $\dot{z}_{t_n/2}$, на яких би функціонал (29) набував мінімуму, використано модифікацію метаевристичного методу рою часточок ME-PSO [15]. Його застосування не вимагає неперервності та диференційованості критерію (34) та не накладає на оптимізаційну задачу жорстких вимог. Як тільки вдалось побудувати функціональну залежність (34) можна використовувати метод ME-PSO та відшукувати оптимальні значення невідомих параметрів $z_{t_n/2}$ та $\dot{z}_{t_n/2}$. У роботі використані наступні параметри методу: прийнятна швидкість зменшення критерію AR = 0,005; кількість часточок (популяція рою) – 50; кількість ітерацій – 50 (рис. 2).

Вказані параметри дозволяють досить ефективно використовувати обчислювальні ресурси для знаходження розв'язку задачі.

Всі розрахунки проведено для стрілової системи крана-маніпулятора з параметрами: $m = 155\kappa c;$ $m_1 = 65\kappa c;$ $m_2 = 500\kappa c;$ $h = 1,9\kappa;$ $z_0 = 1,1\kappa;$ $V = 0,5\kappa/c;$ $a = 1,65\kappa;$ $b = 0,5\kappa;$ $c = 2,2\kappa;$ $d = 1,8\kappa;$ $t_0 = 0c;$ $t_n = 1c;$ $g = 9,81\kappa/c^2$ У результаті

використання методу було отримано такі значення: $z_{t_n/2} = 1,15 M$ та $\dot{z}_{t_n/2} = 0,25 M/c$.



Рис. 2. Графік збіжності критерію до мінімуму. Fig. 2. Graph of the criterion convergence to a minimum.

В результаті розв'язку поставленої оптимізаційної задачі вибору оптимального режиму руху стрілової системи крана-маніпулятора при горизонтальному переміщенні вантажу в процесі зміни вильоту побудовано графічні залежності фазового портрету відхилення (рис. 3), швидкості (рис. 4) та прискорення (рис. 5) вантажу, а також потужності (рис. 6) і узагальненої сили (рис. 7) приводних механізмів.

Аналізуючи фазовий портрет коливань вантажу на шарнірному підвісі (рис. 3) можна зазначити наступне. В процесі пуску стрілової системи кранаманіпулятора при горизонтальному переміщенні вантажу за оптимальним режимом, виникають незначні кутові відхилення вантажу від вертикалі, які при виході на усталеній рух мають затухаючий характер. Максимальне значення відхилення вантажу становить -0,14m, а максимальне значення швидкості відхилення дорівнює -0,28m/c.

Розглядаючи графічну залежність швидкості переміщення вантажу за оптимальним режимом (рис. 4) можна зазначити, що швидкість, як на початку так і в кінці пуску змінюється плавно. При цьому коливання швидкості відсутні. Вихід на усталеній рух відбувається за s-подібним законом руху. За оптимальним режимом переміщення стрілової системи крана-маніпулятора з вантажем, швидкість усталеного руху становить 0,5M/c, а вихід на усталений рух триває t = 1,8c.



Рис. 3. Фазовий портрет відхилення вантажу. **Fig. 3**. Phase portrait of load deflection.



Рис. 4. Графічна залежність швидкості переміщення вантажу.

Fig. 4. Graph dependence the speed of movement the load.



Рис. 5. Графічна залежність прискорення переміщення вантажу.

Fig. 5. Graph dependence of acceleration of the load.

Проводячи аналіз графічної залежності прискорення переміщення вантажу (рис. 5), який

закріплений на шарнірному підвісі, було встановлено, що при оптимальному режимі переміщення пікове значення прискорення становить $0,47 M/c^2$ в момент часу t = 0.8c. При подальшому переміщенні вантажу значення прискорення зменшується і при виході на усталений рух, в момент часу t = 1.8c, дорівнює нулю.



Рис. 6. Графічна залежність затраченої потужності для переміщення вантажу.

Fig. 6. Graph dependence of the power consumed to move the load.

Проаналізувавши графічну залежність затраченої потужності для переміщення вантажу (рис. 6) зроблено такий висновок. В початковий момент руху стрілової системи крана-маніпулятора відбувається зменшення потужності до -15Bm, при t = 0,1c, що зумовлено гравітаційною складовою. В момент часу t = 0.4cпотужність зростає до значення 55Bm, після чого виникає її спад до значення -180Bm. Це спричинено інерційною складовою елементів металоконструкції стрілової системи та коливаннями вантажу закріпленого на шарнірному підвісі в напрямку переміщення гідравлічних циліндрів. В подальшому потужність зростає і при виході на усталений рух становить 140Вт.



Рис. 7. Графічна залежність узагальненої сили. **Fig. 7.** Graph dependence of the generalized force.

Аналізуючи графічну залежність узагальненої сили, що розвивають приводні гідроциліндри (рис. 7) можна зазначити, що на початку руху рушійне зусилля 200Н. При подальшому переміщені становить стрілової системи з вантажем зусилля має спадаючий характер. При цьому мінімальне значення зусилля -400H в момент часу t = 0.8c, що становить відповідає максимальному значенню прискорення (рис. 5). Відповідно це явище пояснюється виникненням інерційної складової елементів кранаметалоконструкції стрілової системи маніпулятора та коливаннями вантажу, закріпленого на шарнірному підвісі, та відповідно збільшенням прискорення (рис. 5). В подальшому значення зусилля зростає і при виході на усталений рух становить 230Н.

Висновки

1. В результаті проведеного дослідження розв'язано задачу оптимізації режиму руху з метою зменшення коливань вантажу на шарнірному підвісі за одночасного переміщення двох ланок стрілової системи крана-маніпулятора. Обґрунтовано комплексний безрозмірний інтегральний динамічний оптимізації, який являє собою критерій середньоквадратичне значення узагальненої сили та потужності приводних механізмів і представлений у вигляді нелінійного інтегрального функціоналу. Отриманий критерій відображає небажані властивості стрілової системи, тому його значення було мінімізоване.

2. Для вирішення поставленої задачі шукані неперервні функції z(t) були замінені багато параметричними функціями. Вони були отримані як вхідний алгоритм ME-PSO для критеріїв (29) і (34). Такі результати були забезпечені стратегією пошуку глобального екстремуму роєм частинок та переініціалізацією рою в разі його застою.

3. Отриманий оптимальний режим переміщення стрілової системи крана-маніпулятора дозволив мінімізувати динамічні навантаження в приводних механізмах та металоконструкції стрілової системи крана-маніпулятора, а також зменшити енергетичні витрати. При отриманих режимах переміщення стрілової системи досягається усунення коливань шарнірно закріпленого вантажу на кінці стрілової системи. Даний ефект дає можливість підвищити продуктивність та зменшити енергетичні витрати крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту вантажу.

Список літератури

1. Ловейкін В.С. Ромасевич Ю.О. Сподоба О.О. Математична модель динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора з вантажем при суміщені рухів Machinery & Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukrain. 2019. vol, 10. No 1. P. 141-149. DOI: 10.31548/machenergy.2019.01.141-149.

2. *Mischuk D*. Research dynamics of the boom manipulator mounted on elastic resistance Underwater

technologies. Industrial and civil engineering. 2018. No 8 P. 54-56. DOI: 10.26884/uwt1808.1301.

3. *Gulianitsky L., Mulessa O.* Applied methods of combinatorial optimization: teach. manual Kyiv. Publishing and printing center "Kyiv University". 2016. 142 p.

4. Ковальский В.Ф. Математическое моделирование динамики манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины с учетом упругости звеньев. Известия МАМИ. 2016. №3. С. 9-15.

5. Мильто А.А. Динамический и прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин: дисс. канд. техн. наук: Москва. МАДГТУ (МАДИ), 2016. 172 с.

6. Бакай Б.Я. Попереднє представлення рівняння динаміки маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера. Науковий вісник НЛТУ України: Львів. Видавництво НЛТУ України, 2011. Вип. 21.18. С. 322–327.

7. *Bozorg-Haddad O., Solgi M., Loáiciga H.* Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboke, USA, John Wiley & Sons Inc, 2017. 304 p.

8. Pylypaka, S.F., Nesvidomin, V.M., Klendii, M.B., Rogovskii, I.L., Kresan, T.A., Trokhaniak, V.I. Conveyance of a particle by a vertical screw, which is limited by a coaxial fixed cylinder. Bulletin of the Karaganda University – Mathematics. 2019. Vol. 95. Issue 3. P. 108– 118. WoS. DOI 10.31489/2019M2/108-119.

9. *Dubrovka F., Vasilenko D.* Constructive synthesis of planar antennas using natural optimization algorithms. Izvestiya high schools, Radio electronics. 2009. No. 4. P. 3-22.

10. *Kiranyaz S, Ince T., Yildirim A., Gabbouj M.* Evolutionary Artificial Neural Networks by Multi-Dimensional Particle Swarm Optimization. Neural Networks. 2009. Vol. 22. Issue 10. P. 1448-1462. DOI: 10.1016/j.neunet.2009.05.013.

11. *Heo J., Lee K., Garduno-Ramirez R.* Multiobjective Control of Power Plants Using Particle Swarm Optimization Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. Vol. 21. Issue 10. P. 552-561. DOI: 10.1109/TEC.2005.858078.

12. Zamani M., Karimi-Ghartemani M., Sadati N., Parniani M. Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization. Control Engineering Practice. 2009. Vol. 17. P. 1380-1387. DOI: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.

13. *Chander A., Chatterjee A., Siarry P.* A New Social and Momentum Component Adaptive PSO Algorithm for Image Segmentation. Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. Issue 5. P. 4998-5004. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.09.151.

14. *Romasevych Y., Loveikin V.* A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies, Bulgarian Academy of Sciences. 2018. Vol. 18(3). P. 62-74. DOI: 10.2478/cait-2018-0039. Scopus.

15. Loveikin V., Romasevych Y., Kadykalo I., Liashko A. Optimization of the swinging mode of the boom crane upon a complex integral criterion. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2019. Vol. 49. Issue 3. P. 285-296. Scopus.

16. Loveikin V., Romasevich Y., Khoroshun A., Shevchuk A. Time-Optimal Control of a Simple Pendulum with a Movable Pivot, Part 1, International Applied Mechanics. 2018. Vol. 54(3). P. 358-365. DOI: 10.1007/s10778-018-0887-x. Scopus.

References

1. Loveikin V., Romasevich Y, Spodoba O. (2019). Mathematical model of the dynamics varying the radius jib system loader crane with a load at adjustment movement. Machinery & Energetics. Journal of Production Research Vol. 10. No 1. 141-149. DOI: 10.31548/machenergy.2019.01.141-149.

2. *Mischuk D.* (2018). Research dynamics of the boom manipulator mounted on elastic resistance Underwater technologies. Industrial and civil engineering. No 8. 54-56. DOI: 10.26884/uwt1808.1301.

3. *Gulianitsky L., Mulessa O.* (2016). Applied methods of combinatorial optimization: teach. manual Kiev. Publishing and printing center "Kyiv University". 142.

4. *Kovalsky V.F.* (2016). Mathematical modeling of the dynamics of the handling system of a mobile transport-technological machine, taking into account the elasticity of the links. MAMI, N^o3, 9-15.

5. *Milto A.A.* (2016). Dynamic and strength analysis of hydraulic crane-manipulators of mobile transport-technological machines (Unpublished candidate thesis). Moscow.

6. *Bakai B.Ya.* (2011). The previous presentation of the dynamic of the manipulator by the Lagrange-Euler method. Vidavnitstvo NLTU Ukraine, 322-327. Lviv.

7. *Bozorg-Haddad O., Solgi M., Loáiciga H.* (2017). Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboke, USA, John Wiley & Sons Inc, 304.

8. Pylypaka, S.F., Nesvidomin, V.M., Klendii, M.B., Rogovskii, I.L., Kresan, T.A., Trokhaniak, V.I. (2019). Conveyance of a particle by a vertical screw, which is limited by a coaxial fixed cylinder. Bulletin of the Karaganda University – Mathematics. Vol. 95. Issue 3. 108–118. WoS. DOI 10.31489/2019M2/108-119. WoS.

9. Dubrovka F., Vasilenko D. (2009). Constructive synthesis of planar antennas using natural optimization algorithms. Izvestiya high schools, Radio electronics. No. 4. 3-22.

10. *Kiranyaz S., Ince T., Yildirim A., Gabbouj M.* (2009). Evolutionary Artificial Neural Networks by Multi-Dimensional Particle Swarm Optimization. Neural Networks. Vol. 22. Issue 10. 1448-1462. DOI: 10.1016/j.neunet.2009.05.013.

11. *Heo J., Lee K., Garduno-Ramirez R.* (2006). Multiobjective Control of Power Plants Using Particle Swarm Optimization Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 21. Issue 10. 552-561. DOI: 10.1109/TEC.2005.858078.

12. Zamani M., Karimi-Ghartemani M., Sadati N., Parniani M. (2009). Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization. Control Engineering Practice. Vol. 17. 1380-1387. DOI: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.

13. Chander A., Chatterjee A., Siarry P. (2011). A New Social and Momentum Component Adaptive PSO Algorithm for Image Segmentation. Expert Systems with Applications. Vol. 38. Issue 5. 4998-5004. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.09.151.

14. Romasevych Y., Loveikin V. (2018). A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies, Bulgarian Academy of Science. Vol. 18(3). 62-74. DOI: 10.2478/cait-2018-0039. Scopus.

15. Loveikin V., Romasevych Y., Kadykalo I., Liashko A. (2019). Optimization of the swinging mode of the boom crane upon a complex integral criterion. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. Vol. 49. Issue 3. 285-296. Scopus.

16. Loveikin V., Romasevich Y., Khoroshun A., Shevchuk A. (2018). Time-Optimal Control of a Simple Pendulum with a Movable Pivot. Part 1. International Applied Mechanics. Vol. 54(3). 358-365. DOI: 10.1007/s10778-018-0887-x. Scopus.

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ИЗМЕНЕНИЯ ВЫЛЕТА СТРЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА

В. С. Ловейкин, Ю. А. Ромасевич, А. А. Сподоба, А. В. Ловейкін, С. А. Шворов

Аннотация. В статье представлено метод решения проблемы, устранения колебаний груза на шарнирном подвесе во время одновременного перемещения двух элементов стреловой системы, а именно подъема рукояти и уменьшения вылета телескопической секции. Суть метода основана на оптимизации режима одновременного перемещения двух элементов стреловой системы кранаманипулятора при горизонтальном перемещении груза в период пуска.

В качестве критерия оптимизации выбрано комплексный интегральный критерий, который является относительным среднеквадратическим значением усилий и мощностей в приводных гидравлических цилиндрах. Разработанный критерий отображает нежелательные свойства элементов стреловой системы и механизмов привода, поэтому его значения сводиться к минимуму.

Поскольку критерий оптимизации является интегральным функционалом, то для его оптимизации использованы методы вариационного исчисления. Решение вариационной задачи оптимизации представлено в виде много параметрических функций, которые удовлетворяют краевые условия движения и минимизируют комплексный безразмерный критерий. С этой целью был использован метод оптимизации роя частиц (ME-PSO). Это дало возможность получить зависимости оптимальных, энергетических и силовых характеристик стреловой системы и механизмов крана-манипулятора. Полученный привода в оптимизации результате режим перемещения элементов стреловой системы улучшил силовые и энергетические характеристики крана-манипулятора, что дало возможность увеличить его надежность и продуктивность.

Ключевые слова: кран-манипулятор, оптимизация, динамические нагрузки, критерий, колебания груза.

COMPREHENSIVE OPTIMIZATION OF MODE OF DEPARTURE OF BOOM SYSTEM OF LOADER CRANE

V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevich, O. O. Spodoba, A. V. Loveikin, S. A. Shvorov

Abstract. The article presents a method for solving the problem, eliminating the oscillations of the load on the knuckle join suspension the simultaneous movement of two elements of the boom system, namely, lifting the jib and movement the telescopic section. The essence of the method is based on the optimization of the regime of simultaneous movement of two elements of the boom system of the loader crane during horizontal movement of the load during the start-up period.

As an optimization criterion, a complex integral criterion was selected, which is a relative root-mean-square value of forces and powers in hydraulic drive cylinders. The developed criterion displays the undesirable properties of the boom system elements and drives mechanism, therefore, its values are minimized.

Since the optimization criterion is an integral functional, variational calculus method are used to optimize it. The solution of the variational optimization problem is presented in the form of many parametric functions that satisfy the boundary conditions of motion and minimize the complex dimensionless criterion. For this purpose, the particle swarm optimization method (ME-PSO) was used. This made it possible to obtain the dependences of the optimal, energy and forces characteristics of the boom system and the drive mechanisms of the crane. The mode of movement of the boom system elements obtained as a result of optimization improved the forces and energy characteristics of the loader crane, which made it possible to increase its reliability and productivity.

Key words: loader crane, optimization, dynamic loads, criterion, load fluctuations.

В. С. Ловейкін ORCID 0000-0003-4259-3900. **Ю. О. Ромасевич** ORCID 0000-0001-5069-5929.

О. О. Сполоба ORCID 0000-0001-8217-866Х.

А. В. Ловейкін ORCID 0000-0002-7988-8350.

С. А. Шворов ORCID 0000-0003-3358-1297.