

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЖИМУ РУХУ ГРЕЙФЕРНОГО ЗАХВАТУ

В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
Ю.О. Ромасевич, кандидат технічних наук
*П.В. Лимар, аспірант**

У роботі розв'язано задачу оптимізації режиму руху грейферного захвату за допомогою прямого варіаційного методу. Отримано оптимальний режим руху гідроциліндра, що керує щелепами захвата, який забезпечує мінімум енергетичних витрат.

Оптимізація, режим руху, варіаційний метод, грейферний захват.

Постановка проблеми. Комплексна механізація і автоматизація вантажно-розвантажувальних, транспортних, складських і інших робіт є однією з актуальних проблем. Оснащення вантажопідйомного устаткування спеціальними вантажозахватними пристроями, а саме грейферними механізмами, сприяє вирішенню цієї проблеми. Високопродуктивні грейферні механізми знаходять також застосування для технологічних цілей. Їх використовують для підготовки і подачі шихти на шихтових і скрапних дворах для робіт на рудних дворах, подачі і збирання формувальних матеріалів у ливарних цехах, тощо. Грейферні механізми використовують на підприємствах лісової, целюлозно-паперової промисловості, лісових складах вугільних шахт і лісоперевалочних базах. Ці механізми знаходять також застосування в сільському господарстві і для спеціальних цілей – проходки вертикальних стовбурів шахт, підйому висадженої породи із шурфів, підйому затонулих суден. Варто помітити, що грейферні механізми є основою виконавчих органів механічних роботів і маніпуляторів. Визначення оптимальних режимів руху грейферних механізмів за енергетичними витратами є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Застосування гідравлічних приводів захвату є найбільш розповсюдженими. Вони розрізняються за положеннями гідроциліндра: з похилим, вертикальним і горизонтальним циліндрами [1]. Теоретичні аспекти, які розглядаються в процесі проектування грейферів це структурні властивості, параметри і кінематика руху грейферного механізму [2].

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

Розробка концепції захоплення грейферами деревини вперше була описана Таубером [3], а визначення геометричних параметрів грейферних механізмів висвітлюються у роботах О.П. Асяткина [4], С.І. Грицюка [5] та інших авторів. Дослідженню оптимізації режимів руху різних механічних систем присвячено роботи [6, 7, 8], в яких розглядається оптимальне керування рухом вантажопідйомних, будівельних та підйомно-транспортних машин. Проте дослідження оптимізації режимів руху грейферних механізмів практично не проводились.

Мета досліджень полягає в оптимізації режимів руху грейферних механізмів за енергетичним критерієм.

Результати досліджень. Грейферний пристрій представляємо у вигляді плоского механізму (рис. 1). Він складається з п'яти рухомих ланок: 1 – штока гідроциліндра; 2 – циліндра; 3 – правої щелепи; 4 – лівої щелепи; 5 – важеля, який забезпечує симетричний рух щелеп 3 і 4, та нерухомої ланки рамної конструкції грейфера. Даний механізм має 7 кінематичних пар п'ятого класу (O_1, O_2, A, B, C, D, E). Визначимо за допомогою формули П.Л. Чебишева ступінь рухомості даного механізму [7]:

$$W = 3n - 2P_5 - P_4, \quad (1)$$

де $n=5$ – кількість рухомих ланок механізму, $P_5=7$ – кількість кінематичних пар п'ятого класу; $P_4=0$ – кількість кінематичних пар четвертого класу. Підставивши числові значення в формулу (1), отримаємо:

$$W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 1.$$

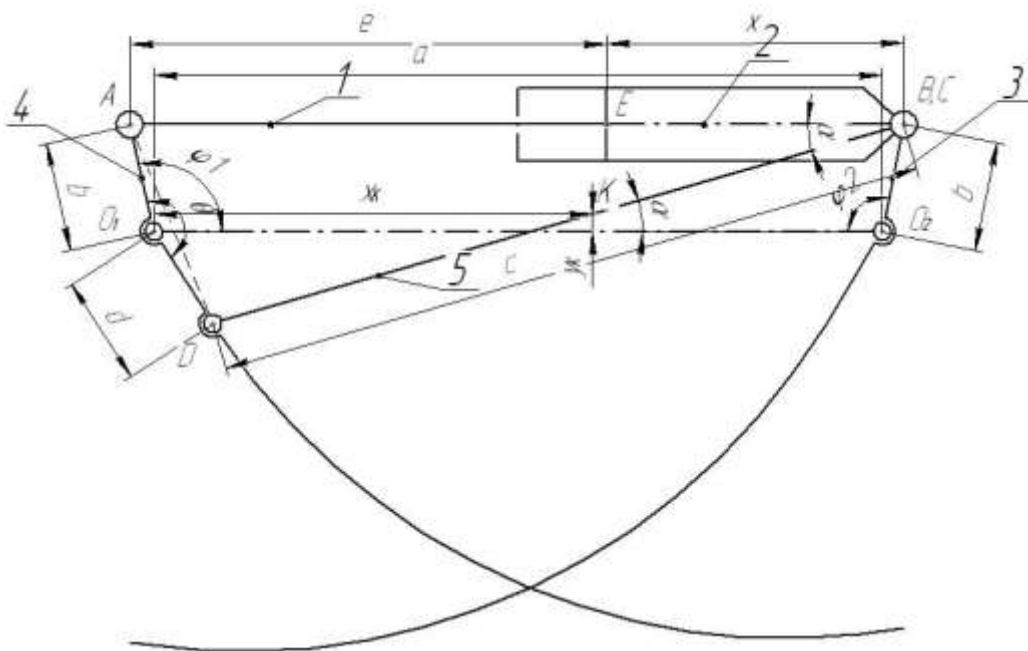


Рис. 1. Схема грейферного захвату.

Даний механізм має одну ступінь рухомості, тобто одну ведучу ланку. Такою ланкою є шток гідроциліндра. Вихідними даними що визначають геометричні параметри грейфера є: $b=d=0.12$, $e=0.6$ м, $c=0.79$ м, $\theta=160^\circ$, $a=0.8$ м. Переміщення штока гідроциліндра характеризується координатою x , а переміщення щелеп визначаються координатами φ_1 і φ_2 , які визначаються залежностями:

$$\varphi_1 = \arccos \left(-B + \sqrt{\frac{B^2 - AC}{A}} \right); \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left\{ \frac{1}{b} \left[a - d \cos(\theta - \varphi_1) - \frac{e+x}{2} - \frac{c^2 - b^2 - d^2 + 2bd \cos \theta}{2(e+x)} \right] \right\}, \quad (3)$$

в яких для спрощення виразу використовуємо наступні рівняння:

$$A = b^2 - 2bd \cos \theta + d^2;$$

$$B = \frac{1}{2} (b - d \cos \theta) \left(e - x - \frac{c^2 - b^2 - d^2 + 2bd \cos \theta}{e + x} \right);$$

$$C = \frac{1}{4} \left(e + x - \frac{c^2 - b^2 - d^2 + 2bd \cos \theta}{e + x} \right)^2 - d^2 \sin^2 \theta,$$

де a – відстань між осями повороту грейфера; b , d – відстані від осей повороту щелеп до осей їх з'єднання з іншими ланками грейфера; c – довжина важеля 5; e – довжина штоку гідроциліндра; θ – кут розвороту лівої щелепи між кінематичними парами A і D .

Кут α , що показує нахил важеля 5 до горизонту, визначається за таким виразом:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(e + x)^2 + c^2 - b^2 - d^2 + 2bd \cos \theta}{2c(e + x)} \right). \quad (4)$$

Важіль 5 здійснює плоско-паралельний рух – поступальне переміщення центра мас (точка K) і поворот навколо цього центра з кутовою координатою α . Координати точки K визначаються такими залежностями:

$$\begin{cases} x_K = d \cos(\theta - \varphi_1) + \frac{1}{2} c \cos \alpha; \\ y_K = -d \sin(\theta - \varphi_1) + \frac{1}{2} c \sin \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

Знайти також узагальнені швидкості точки K :

$$\begin{cases} \dot{x}_K = \dot{\varphi}_1 d \sin(\theta - \varphi_1) - \frac{\dot{\alpha}}{2} c \sin \alpha; \\ \dot{y}_K = \dot{\varphi}_1 d \cos(\theta - \varphi_1) + \frac{\dot{\alpha}}{2} c \cos \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Щелепи 4 і 3 здійснюють обертальний рух відносно точок O_1 і O_2 і характеризуються кутовими координатами φ_1 і φ_2 . Шток 1 гідроциліндра здійснює поступальний рух і його координати центра мас визначаються координатою точки A . Гільза 2 гідроциліндра здійснює поступальний рух і її координати центра мас визначаються координатою точки B . Нехтуємо можливим поворотом штока та гільзи гідроциліндра, оскільки вони практично відсутні.

Для оптимізації енергетичного режиму руху грейферного захвата використаємо інтегральний критерій, який представляє собою середнє за час руху значення кінетичної енергії

$$I_T = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} T dt, \quad (7)$$

де t – час; $t_1=5$ с – тривалість руху штока гідроциліндра з одного крайнього положення в інше; T – кінетична енергія грейфера.

Визначимо кінетичну енергію грейфера

$$T = \frac{1}{2} m_1 V_A^2 + \frac{1}{2} m_2 V_B^2 + \frac{1}{2} J_{O2} \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} J_{O1} \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_5 (\dot{x}_K^2 + \dot{y}_K^2) + \frac{1}{2} J_K \dot{\alpha}^2, \quad (8)$$

де $m_1=15$ кг, $m_2=20$ кг, $m_5=10$ кг – відповідно маси штока, гільзи гідроциліндра та важеля; $J_{O1}=J_{O2}=6,54$ кг·м² – моменти інерції щелеп відносно осей обертання; $J_K=0,52$ кг·м² – момент інерції важеля відносно центра мас; V_A , V_B лінійні швидкості точок A і B щелеп грейфера (рис.1); \dot{x}_K , \dot{y}_K – горизонтальна та вертикальна складові швидкості центра мас важеля; $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$, $\dot{\alpha}$ – кутові швидкості відповідно лівої, правої щелеп та важеля.

Швидкості точок A і B щелеп грейфера визначаються залежностями:

$$\begin{cases} V_A = \dot{\varphi}_1 b \\ V_B = \dot{\varphi}_2 b' \end{cases} \quad (9)$$

де b – довжина плеча прикладання зусиль гідроциліндра.

Після підстановки залежностей (6) і (9) у вираз (8), отримаємо

$$T = \frac{1}{2} (m_1 b^2 + m_5 d^2 + J_{O1}) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} (m_2 b'^2 + J_{O2}) \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} (m_5 c^2 / 4 + J_K) \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_5 c d \dot{\varphi}_1 \dot{\alpha} \cos(\theta + \alpha + \varphi_1). \quad (10)$$

Якщо прийняти

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \dot{x} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \\ \dot{\varphi}_2 = \dot{x} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \\ \dot{\alpha} = \dot{x} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \end{cases}, \quad (11)$$

то кінетична енергія має такий вигляд:

$$T = \frac{1}{2}(m_1 b^2 + m_5 d^2 + J_{O1})\dot{x}^2 \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}(m_2 b^2 + J_{O2})\dot{x}^2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{m_5 c^2}{4} + J_K\right)\dot{x}^2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}m_5 c d \dot{x}^2 \frac{\partial \alpha}{\partial x} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \cos(\theta + \alpha + \varphi_1). \quad (12)$$

Для знаходження оптимального енергетичного режиму руху рейферного механізму застосуємо класичне варіаційне числення. Для цього визначимо необхідну умову мінімуму критерію (7) – рівняння Ейлера-Пуассона [7], з урахуванням виразу (12). Умовою мінімуму критерію I_T є рівняння:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (13)$$

Після підстановки виразу (12) у рівняння (13) отримаємо:

$$\begin{aligned} & \ddot{x} \left((m_1 b^2 + m_5 d^2 + J_{O1}) \left(\frac{d\varphi_1}{dx}\right)^2 + (m_2 b^2 + J_{O2}) \left(\frac{d\varphi_2}{dx}\right)^2 \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{m_5 c^2}{4} + J_K\right) \left(\frac{d\alpha}{dx}\right)^2 + \right. \\ & \quad \left. + m_5 c d \frac{d\alpha}{dx} \frac{d\varphi_1}{dx} \cos(\theta + \alpha + \varphi_1) \right) + \dot{x}^2 \left((m_1 b^2 + m_5 d^2 + J_{O1}) \frac{d\varphi_1}{dx} \frac{d^2 \varphi_1}{dx^2} + \right. \\ & \quad \left. + (m_2 b^2 + J_{O2}) \frac{d\varphi_2}{dx} \frac{d^2 \varphi_2}{dx^2} + \left(\frac{m_5 c^2}{4} + J_K\right) \frac{d\alpha}{dx} \frac{d^2 \alpha}{dx^2} + \frac{1}{2} m_5 c d \times \right. \\ & \quad \left. \times \left(\left(\frac{d\alpha}{dx} \frac{d^2 \varphi_1}{dx^2} + \frac{d\varphi_1}{dx} \frac{d^2 \alpha}{dx^2}\right) \cos(\theta + \alpha + \varphi_1) - \left(\frac{d\alpha}{dx}\right)^2 \frac{d\varphi_1}{dx} + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \left(\frac{d\varphi_1}{dx}\right)^2 \frac{d^2 \alpha}{dx^2} \right) \sin(\theta + \alpha + \varphi_1) \right) = 0. \quad (14) \end{aligned}$$

Отримане рівняння є нелінійним однорідним диференціальним рівнянням другого порядку. Розв'язання вказаного рівняння є досить складною задачею, яка не може бути розв'язана в аналітичному вигляді. Тому використаємо прямий варіаційний метод, який запропоновано в роботі [10]. Задамо необхідні крайові умови:

$$\begin{cases} x(0) = x_0; \dot{x}_0 = 0; \\ x(t_1/2) = q_1; \\ x(t_1) = x_0 + s; \dot{x}_{t_1} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Згідно методу, знаходимо опорну функцію, яка є розв'язком

крайової задачі:

$$x(t) = \frac{16q_1 t^2 (t-t_1)^2 - (2t-t_1)(st^2(4t-5t_1) + (8t^3 - 12t^2 t_1 + 2t t_1^2 + t_1^3)x_0)}{t_1^4}, \quad (16)$$

де q_1 – положення штока гідроциліндра; $s=0,25\text{м}$ – хід штока гідроциліндра; $x_0=0,05\text{м}$ – початкове положення гідроциліндра. Підставимо закон руху у підінтегральний вираз (12) функціоналу (7) та знайдемо інтеграл. Функціонал перетворюється у складну функцію параметра q_1 . Для того, щоб мінімізувати значення інтегралу необхідно розв'язати рівняння

$$\frac{\partial I}{\partial q_1} = 0. \quad (17)$$

Це рівняння має лінійний алгебраїчний вигляд, тому будемо шукати мінімум критерію безпосередньо підстановкою значень q_1 у вираз функціоналу та порівнювати величини критерію між собою. Для цього був розроблений алгоритм, приведений нижче (рис. 2).

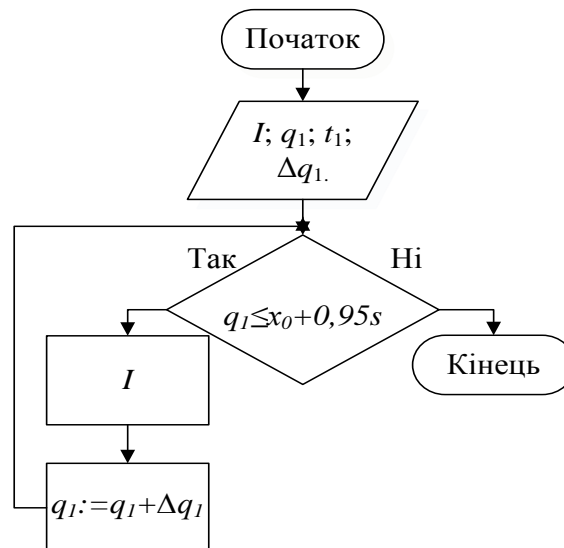


Рис. 2. Алгоритм знаходження мінімуму критерію.

Сутність алгоритму полягає в тому, що на кожному кроці циклу до кожного значення q_1 додається крок $\Delta q_1 = s \cdot 0,01$ і визначається величина критерію. Після проходження всіх циклів, значення порівнюються між собою і знаходиться найменше значення критерію (рис. 3). Також побудуємо графік швидкості зміни положення штока гідроциліндра q_1 (рис. 4).

На основі проведених розрахунків визначили, що найменше значення критерію досягається при $q_1 = 0,1725$ та побудували графік (рис. 3). Для цього значення наведемо кінематичні функції руху щелеп (рис. 5 – рис. 7).

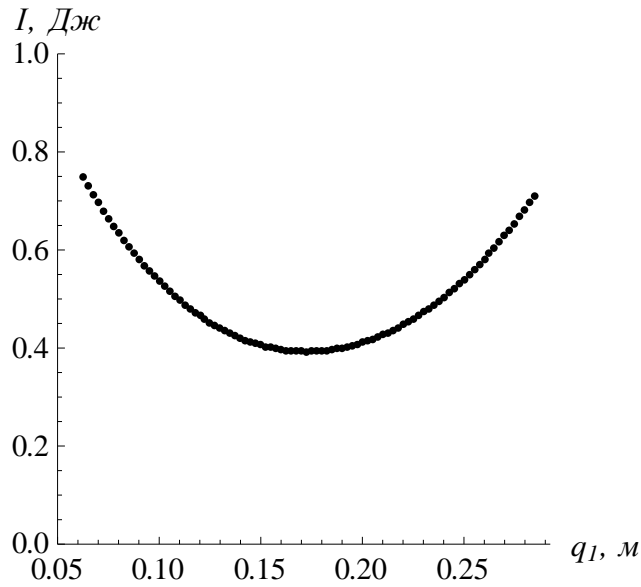


Рис. 3. Графік залежності величин критерію від параметра q_1 .

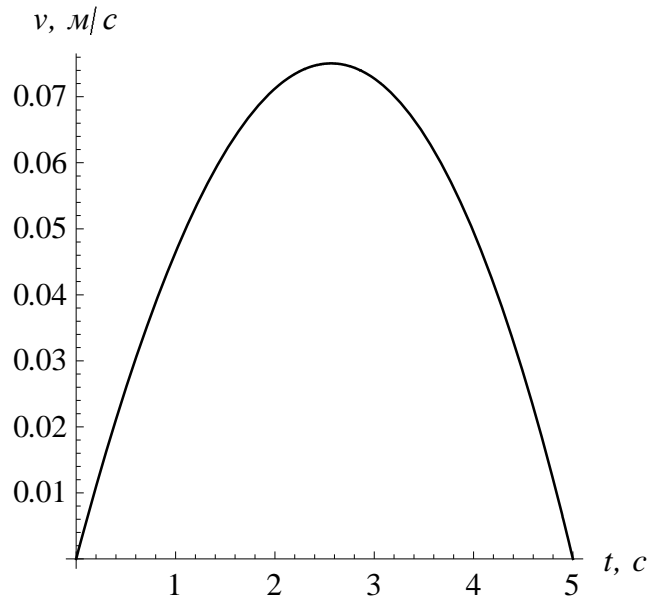


Рис. 4. Графік швидкості штоку гідроциліндра.

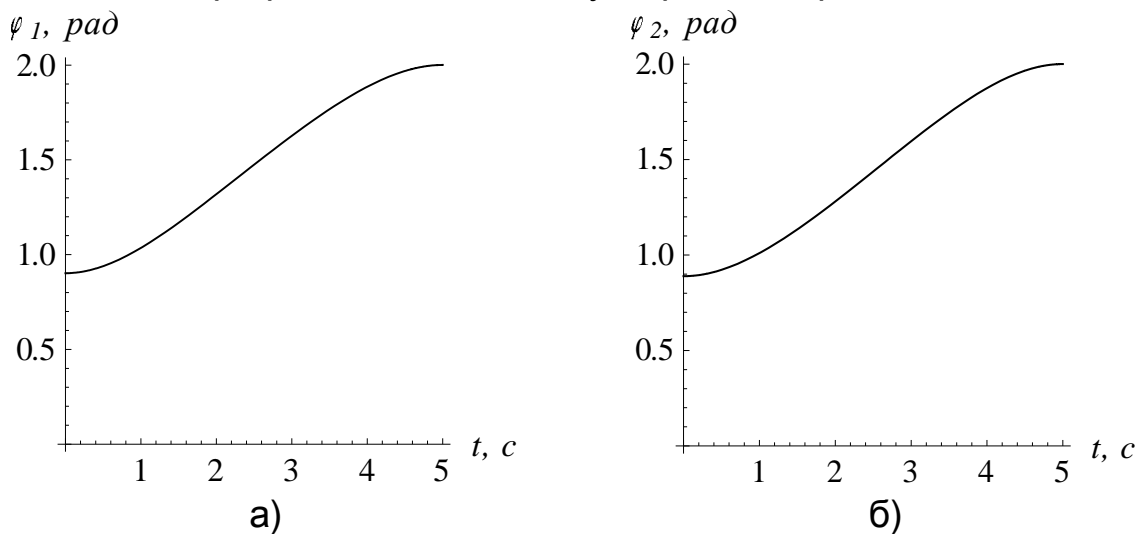


Рис. 5. Графіки зміни кутових координат кутів: а – $\varphi_1(t)$; б – $\varphi_2(t)$.

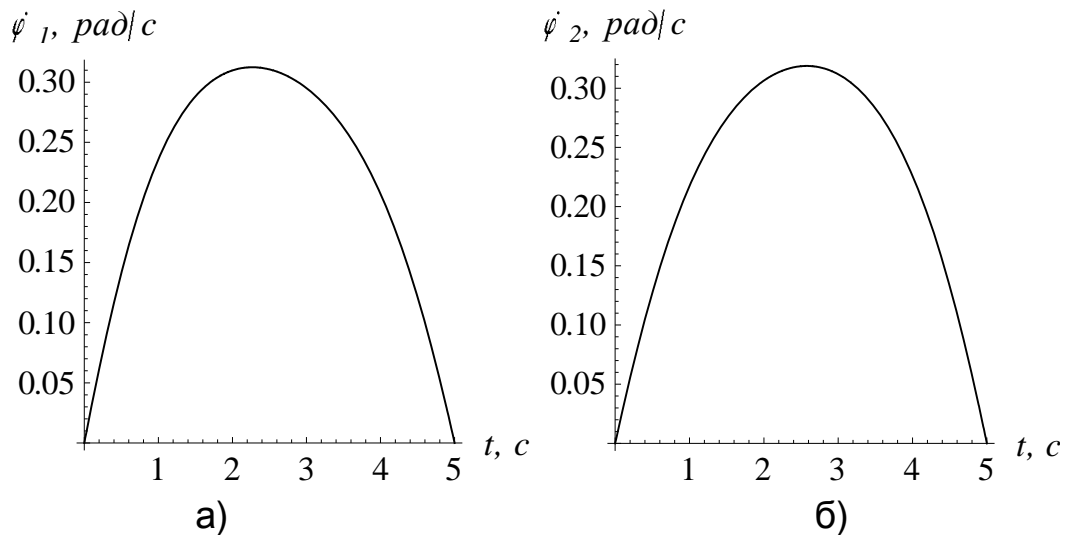


Рис. 6. Графіки кутових швидкостей: а - $\dot{\psi}_1(t)$; б - $\dot{\psi}_2(t)$.

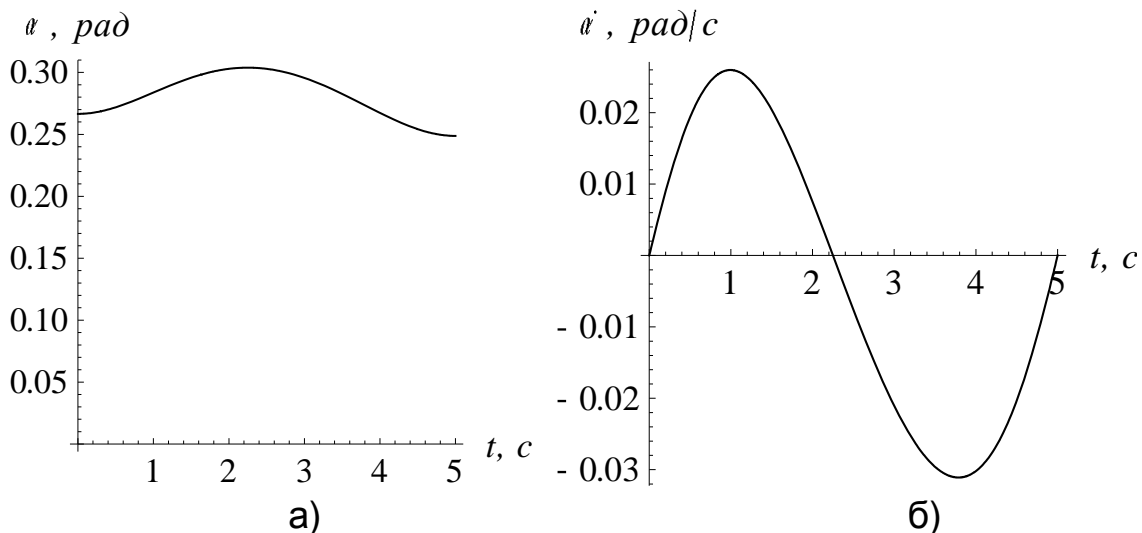


Рис. 7. Графіки зміни кутової координати (а) і швидкості (б) важеля.

З даних графіків видно, що отриманий оптимальний режим руху гідроциліндра при закриванні щелеп грейфера забезпечує не значну зміну кутових координат та плавну зміну кутової швидкості щелеп.

Висновки

Синтезовано наближений до оптимального енергетичного режиму, режим руху гідроциліндра грейферного механізму, що керує щелепами, який доставляє мінімум обраному критерію середнього значення кінетичної енергії за час руху.

Закон руху (16) представляє собою оптимальний режим руху, що забезпечує мінімум енергетичних витрат і дає можливість підвищити ефективність роботи грейферного механізму. Він може бути реалізований засобами мехатроніки.

Список літератури

1. Wang, J. and G. Li. 1993. A review of log grapple used in China. J. of Forest Engineering. 4(2): P. 33–36.
2. Wang, J. 1990. Study on the theories of log grapples. Ph.D. Dissertation. Northeast Forestry University, Harbin, China. 311 pp.
3. Таубер Б.А. Грейферные механизмы. Теория, расчет и конструкции / Б.А. Таубер. – М.: Машиностроение, 1967. – 424 с.
4. Асяткин О.П. Исследование основных конструктивных и эксплуатационных параметров напорных грейферов для погрузки силоса на животноводческих фермах. Автореф. дис. канд. техн. наук / О.П. Асяткин. – Краснодар, 1966. – 25 с.
5. Грицюк С.И. Методика проекторочного расчета гидравлического грейфера для стеблевых грузов / С.И. Грицюк // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1975. – №12. – С. 22–24.
6. Григоров О.В. Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин / О.В. Григоров, В. Ловейкін. – К.: Наука, 1997. – 262с.
7. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин. – К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук, С.І. Пастушенко. – Київ-Миколаїв: МДАУ, 2004. – 285 с.
9. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом / В.С. Ловейкін, А.В. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – Том 15. – №1. – С. 30–39.
10. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2010. – 184 с.

В работе решена задача оптимизации режима движения грейферного захвата с помощью прямого вариационного метода. Получен оптимальный режим движения гидроцилиндра, управляющий челюстями захвата, который обеспечивает минимум энергетических затрат.

Оптимизация, режим движения, вариационный метод, грейферный захват.

In paper solved the problem of optimization of motion mode clam Bucket by direct variational method. Try the optimal mode of motion hydraulic cylinder that controls the jaws of capture, which minimizes energy costs.

Optimization, drive mode, variational method, grapple.