

відводу шляхом зміни витрати охолоджувальної рідини в процесі охолодження від 0 до 60...65 м³/год протягом перших 30 секунд. Мікроструктура дослідних залізничних коліс після диференційної термічної обробки наведена на рисунку 3 в, г.

Висновок. При взаємодії тіл з рухомою точкою контакту необхідно враховувати фізико-механічні властивості поверхневих шарів, які відрізняються від властивостей матеріалу, розташованого на значній відстані від його поверхні. Ця різниця з'являється в результаті хімічних і структурних перетворень, механічного та теплового впливу, зносу і контактної втоми матеріалів поверхонь фрикційної пари колесо–рейка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
2. Франчук, В.П. Взаємодія тіл з рухомою точкою контакту / В.П. Франчук, К.А. Зіборов. – Дніпро: НГУ, 2017. – 96 с.
3. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О. В., Майстренко К. М., Подольський Р. В. Розробка сталей для металопродукції залізничного призначення: монографія. Дніпро: «Домінанта-принт», 2020. – 298 с.

УДК 621.86

ПРАКТИКА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОЮ ЧАСТИНОК В ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РУХУ МАНІПУЛЯТОРА

Д.О. Міщук¹, Є.О. Міщук², Є.В. Горбатюк³

¹доцент кафедри будівельних машин, e-mail: mischuk.do@knuba.edu.ua

²доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів, e-mail: mischuk.ieo@knuba.edu.ua

³доцент кафедри будівельних машин, e-mail: ek_gor@i.ua

^{1,2,3}Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Анотація. Застосування класичного методу рою частинок для пошуку оптимального режиму руху стріли маніпулятора за однієї з узагальнених координат має практичну цінність, так як дозволяє визначити розв'язки складних диференціальних рівнянь руху, які мають значну аналітичну складність. В даному дослідженні застосовано пошук цільової функції оптимізації у виді «енергії прискорень» механічної системи, пошук оптимального закону переміщення для якого здійснюється поліномом четвертого порядку.

Ключові слова: метод рою частинок, маніпулятор, оптимізація.

PRACTICE OF APPLICATION OF THE PARTICULAR SWARE METHOD IN THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF THE MOVEMENT MODE OF THE MANIPULATOR

D.O. Mishchuk¹, Ye.O. Mishchuk², Ie.V. Gorbatyuk³

¹Associate Professor of the Department of Construction Machinery, e-mail: mischuk.do@knuba.edu.ua

²Associate Professor of Machinery and Equipment of Technological Processes, e-mail: mischuk.ieo@knuba.edu.ua

³Associate Professor of the Department of Construction Machinery, e-mail: ek_gor@i.ua

^{1,2,3} Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

Abstract. The application of the classical method of particle swarm to find the optimal mode of movement of the manipulator boom at one of the generalized coordinates has practical value, as it allows to determine solutions of complex differential equations of motion, which have significant analytical complexity. This study uses the search for the objective optimization function in the form of "acceleration energy" of a mechanical system, the search for the optimal law of displacement for which is carried out by a fourth-order polynomial.

Keywords: particle swarm method, manipulator, optimization.

Вступ. Для визначення оптимальних режимів руху вантажопідйомних машин і маніпуляторів, зокрема, застосовують цільові функції, які характеризують енергетичні витрати механічної системи, як наприклад кінетична енергія, енергія прискорень та енергія ривків [1, 2]. Цільові функції оптимізації зазвичай записують у виді інтегральних функціоналів [3]. Як правило, цільові оптимізаційні функції зазвичай описуються складними нелінійними формулами з багатьма незалежними параметрами, а це ускладнює пошук екстремумів класичними методиками пошуку [4].

Мета роботи полягає в демонстрації практичного застосування методу рою частинок для розв'язку задачі пошуку локального мінімуму заданого рівняння на деякому проміжку числових рішень.

Матеріал і результат досліджень. Згідно методу рою частинок, кожна частинка рою, яка рухається в просторі, описується своїм положенням та швидкістю переміщення, які визначають множину розв'язків заданого рівняння. Для оптимізації методом рою частинок необхідно визначити найвигідніших умов існування множини частинок на площині рішень заданої функціональної залежності [5]. Кожна частинка рою описуватиметься вектором з координатами її положення, які відповідатимуть параметрам цільової функції

$$p_i(\tau) = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_N] , \quad (1)$$

де N – розмірність задачі; τ – момент часу, при якому розраховується дана точка координат.

Кожна частинка рою на початковому етапі розміщується випадковим чином в заданій області пошуку:

$$a_{k_min} \leq a_k \leq a_{k_max}, \quad (2)$$

де a_{k_min} та a_{k_max} – діапазон зміни коефіцієнтів цільової функції, яка підлягає оптимізація. Якщо $p_i(\tau)$ – положення i -ої частинки рою в момент часу τ , тоді рішення про те, яке положення ця частинка повинна зайняти приймається на основі поточного положення частинки та оновленої швидкості:

$$p_i(\tau) = f(a_1(\tau), a_2(\tau), a_3(\tau)); \quad (3)$$

$$p_i(\tau + \Delta\tau) = f(a_1(\tau + \Delta\tau), a_2(\tau + \Delta\tau), a_3(\tau + \Delta\tau)), \quad (4)$$

де

$$\begin{cases} a_1^i(\tau + \Delta\tau) = a_1^i(\tau) + v_{a_1}^i(\tau + \Delta\tau); \\ a_2^i(\tau + \Delta\tau) = a_2^i(\tau) + v_{a_2}^i(\tau + \Delta\tau); \\ \dots \\ a_N^i(\tau + \Delta\tau) = a_N^i(\tau) + v_{a_N}^i(\tau + \Delta\tau); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{a_1}^i(\tau + \Delta\tau) = w_i v_{a_1}^i(\tau) + c_1 R_1 (p_{best_{a_1}}^i(\tau) - a_1^i(\tau)) + c_2 R_2 (g_{best}(\tau) - a_1^i(\tau)); \\ \dots \\ v_{a_N}^i(\tau + \Delta\tau) = w_i v_{a_N}^i(\tau) + c_1 R_1 (p_{best_{a_N}}^i(\tau) - a_N^i(\tau)) + c_2 R_2 (g_{best}(\tau) - a_N^i(\tau)), \end{cases} \quad (6)$$

де $p_{best}^i(\tau)$ – координати найкращого знайденого положення частинкою рою; $g_{best}(\tau)$ – координати найкращого положення всього рою; w_i , c_1 , c_2 – вагові коефіцієнти; R_1 , R_2 – незалежні випадкові числа з діапазону від 0 до 1, які застосовують як коефіцієнти залишкової пам'яті частинки.

Алгоритм роботи методу рою частинок наступний:

1. визначити та ініціалізувати функцію оптимізації;
2. задати діапазони зміни параметрів, які будуть визначатися даним алгоритмом та встановити кількість кроків ітерації;
3. задати кількість частинок рою та початкові координати кожної частинки;
4. визначити швидкості кожної частинки та розрахувати її нові координати;
5. для кожної частинки рою розрахувати значення функції оптимізації та визначити частинку, яка найкраще задовольняє задану умову функції оптимізації;
6. повторити пункти 4 та 5 задану кількість кроків ітерації.

Для маніпулятора з однією ступеню вільності, оптимальний динамічний режим руху визначається шляхом мінімізації інтегралу з підінтегральним виразом у виді функції «енергії прискорень» стрілової системи за узагальненою координатою:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{2} J_{\Sigma\alpha} \left(\ddot{q}_1 \frac{\partial \alpha_1}{\partial q_1} + \dot{q}_1^2 \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial q_1^2} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $J_{\Sigma\alpha}$ – момент інерції стрілової системи маніпулятора з вантажем, який зведено до осі її повороту (наближено прийнято $J_{\Sigma\alpha} = (\frac{1}{3} m_{cm} + m_e) l_{cm}^2$), m_{cm} , m_e – маса стріли та вантажу відповідно; l_{cm} – довжина стріли; q_1 – лінійна узагальнена координата; $\ddot{q}_1 = \frac{d^2 q_1}{dt^2}$ – лінійне прискорення штока гідроциліндра;

$$\dot{q}_1 = \frac{dq_1}{dt} \quad - \quad \text{швидкість} \quad \text{штока}; \quad \frac{\partial \alpha_1}{\partial q_1} = \frac{q_1}{ab \sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - q_1^2)^2}{4a^2 b^2}}};$$

$$\frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial q_1^2} = - \frac{q_1^2 (a^2 + b^2 - q_1^2)}{2a^3 b^3 \sqrt{\left(1 - \frac{(a^2 + b^2 - q_1^2)^2}{4a^2 b^2}\right)^2}} + \frac{1}{ab \sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - q_1^2)^2}{4a^2 b^2}}}; \quad a, b \text{ – геомет-}$$

ричні розміри встановлення гідроциліндра.

Розв'язок рівняння (7) аналітичними методами матиме складну форму залежності узагальненої координати від часу. Аналіз подібних задач, показав, що необхідно застосовувати числові методи, зокрема і метод роб частинок.

Застосовуючи метод рою частинок для поставленої задачі, поставлену цільову функцію перетворено та приведено до простої форми:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{-4q_1(A_1 A_2 \dot{q}_1^2 + q_1 A_1^2 \ddot{q}_1)}{A_1^4} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $A_1 = (a^2 - b^2) + q_1^2$; $A_2 = (a^2 - b^2) - q_1^2$.

Розв'язок отриманого функціоналу необхідно виконувати враховуючи обмеження на переміщення по узагальненій координаті за наступних умов: $q_1 = q_{1n}$, $\dot{q}_1 = 0$ при $t = t_0 = 0$ та $q_1 = q_{1k}$, $\dot{q}_1 = 0$ при $t = t_1$.

Таким чином розв'язок функціоналу (8) було подано у виді сплайн-функції четвертого порядку:

$$q_1(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4, \quad (9)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – невідомі коефіцієнти.

Визначивши першу та другу похідну залежності (9) та прийнявши задані крайові умови, отримано:

$$\dot{q}_1(t) = C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2 + 4C_5 t^3; \quad (10)$$

$$\ddot{q}_1(t) = 2C_3 + 6C_4t + 12C_5t^2. \quad (11)$$

Із отриманих виразів знайдено: $C_1 = q_{1n}$; $C_2 = 0$; $C_3 = \frac{3}{t_1^2} \Delta q_1 + C_5 t_1^2$;

$$C_4 = -\frac{2}{t_1^3} \Delta q_1 - 2C_5 t_1, \text{ де } \Delta q_1 = q_{1k} - q_{1n}.$$

Таким чином було сформовано цільову функцію оптимізації методом рою частинок

$$f_i(C_5, t) = I(C_5, t), \quad (12)$$

де $I(C_5, t)$ – це значення функції (8) при заданих параметрах C_5 і t .

Для чисельної реалізації методу рою використано систему Mathematica. Алгоритм ініціалізації рою показано Рис. 1.

Висновки. Застосування методу рою частинок має практичне значення та дозволяє розв'язувати чисельним способом складні диференційні рівняння.

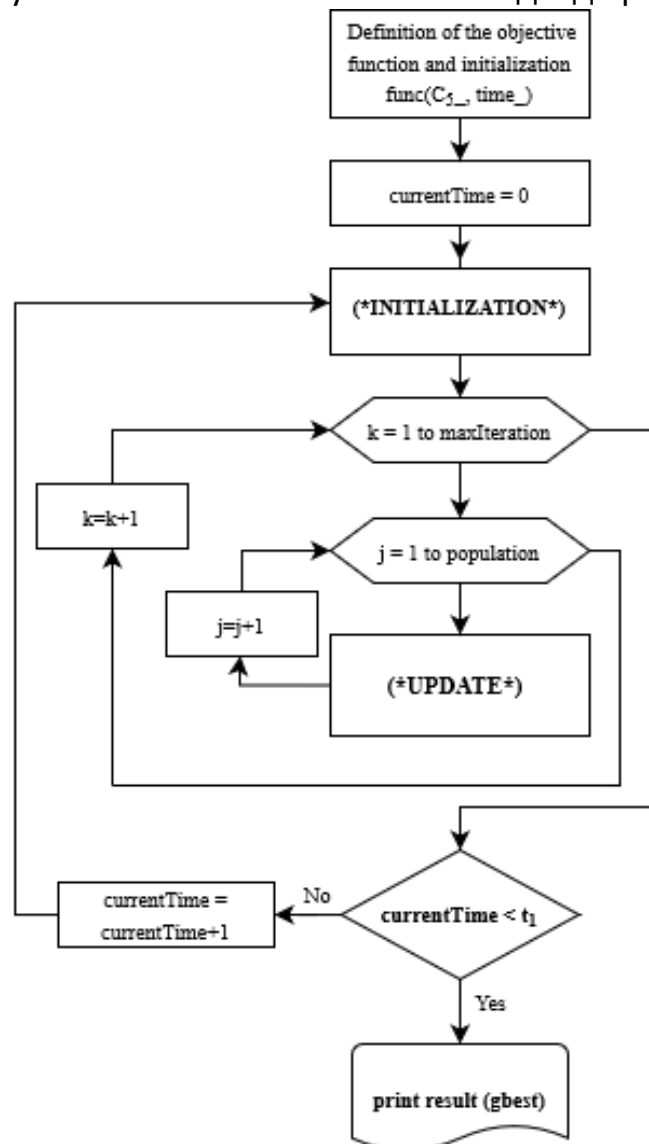


Рис. 1. – Загальний алгоритм розрахунку параметрів частинки рою

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловейкін В. С. Оптимізація режимів зміни вильоту маніпулятора з гідроприводом. Монографія / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук. – Київ: ЦП «Компринт», – 2013. – 206.
2. Ловейкін В. Оптимізація режиму пуску механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі / В. Ловейкін, І. Кадикало // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, – 2017 – №90, 34–41. <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/143520>
3. Ловейкін В. С. Визначення оптимальних режимів руху маніпулятора за процес пуску (гальмування) під час роботи за однією з узагальнених координат / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2009. – № 73. – С. 35–42.
4. Xu Zhaoyue & Du Lin. Particle swarm optimization-based algorithm of a symplectic method for robotic dynamics and control / Zhaoyue Xu, Lin Du, Haopeng Wang, Zi-chen Deng // Applied Mathematics and Mechanics. – 2018 – P. 40. <https://doi.org/10.1007/s10483-019-2412-6>.
5. Міщук Д. Дослідження методу рою частинок в задачі оптимізації режиму руху маніпулятора за однією з узагальнених координат / Д. Міщук, Є. Міщук, Є. Горбатюк. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, – 2021 – №98, 11–20. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0201>.

REFERENCES

1. Lovejkin V. S., Mischuk D. O. (2013). Optimizaciya rezhimiv zmini vilotu manipulyatora z gidroprivodom. Monografiya. [The optimization modes of change departure the manipulator with hydraulic drive. Monograph]. Kyiv, CP Komprint Publ., 206.
2. Lovejkin V., Kadikalo I. (2017). Optimization of the starting mode of the jib crane mechanism by the criterion of the RMS value of the elastic moment in the drive. Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioretion machines], (90), 34–41. – (in Ukrainian). <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/143520>.
3. Lovejkin V. S., Mishuk D. O. (2009). Vznachennya optimalnih rezhimiv ruhu manipulyatora za proces pusku (galmuvannya) pid chas roboti za odniyeyu z uzagalnenih koordinat [Determining the optimal modes of movement of the manipulator for the process of starting (braking) while working on one of the generalized coordinates]. Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini, [Mining, Constructional, Road and Melioration Machines], No.73, 35–42. – (in Ukrainian).
4. Xu, Zhaoyue & Du, Lin & Wang, Haopeng & Deng, Zichen. (2018). Particle swarm optimization-based algorithm of a symplectic method for robotic dynamics and control. Applied Mathematics and Mechanics. 40. <https://doi.org/10.1007/s10483-019-2412-6>.
5. Mishchuk D., Mishchuk Ye., Gorbatiyuk Ie. (2021). Research of the particle swarm method in the problem of optimizing the mode of motion of the manipulator along one of the generalized coordinates. Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioretion machines], (98), 11–20. – (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0201>.