

Дослідження методу рою частинок в задачі оптимізації режиму руху маніпулятора за однією з узагальнених координат

Дмитро Міщук¹, Євген Міщук², Євгеній Горбатюк³

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03037

¹mischuk.do@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>,

²mischuk.ieu@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>,

³ek_gor@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8148-5323>

Received: 01.06.2021; Accepted: 10.11.2021

<https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0201>

Анотація. Задачі оптимізації режимів руху механічних систем, зокрема роботів та маніпуляторів, є актуальною в контексті сучасного розвитку суспільства та машинобудування. Роботи і маніпулятори здатні автономно виконувати складні задачі по заданих програмах керування, що значно знижує вартість виконуваних ними робіт. Алгоритми оптимальних переміщень складових елементів роботів і маніпуляторів дозволяють реалізовувати складні траєкторії переміщень їхніх робочих органів з прогнозованими енерговитратами, точністю позиціонування, швидкодією. Пошук оптимальних режимів руху є складною і не однозначною задачею, що вимагає точного формулювання функції оптимізації, рівнянь обмежень та методів визначення оптимальних законів, які б задовольняли критерії поставленої оптимізаційної задачі. Одним із шляхів вирішення таких складних задач є евристичні методи перебору варіантів розв'язку на обмеженій площині, зокрема одним з таких є методів рою частинок.

В даному дослідженні проаналізовано класичний метод рою частинок для пошуку оптимального режиму руху стріли маніпулятора за однієї з узагальнених координат. Цільовою функцією оптимізації вибрано «енергію» прискорень механічної системи, а пошук оптимального закону переміщення здійснюється із застосуванням полінома четвертого порядку.

Проведене теоретичне дослідження показало, що метод рою частинок може бути застосований для пошуку оптимальних законів руху, проте при роботі з даним методом необхідно модернізувати алгоритм визначення його складових, зокрема швидкості переміщення частинок та їх корегувальних коефіцієнтів.

При визначенні оптимальних законів руху маніпулятора методом рою в даному дослідженні застосовується підхід, де прийнято, що час є дискретним, а значення цільової функції визначалося лише в прийнятих точках дискретизації часу.

Ключові слова: метод рою частинок, система керування, оптимізація, маніпулятор, узагальнені координати, Mathematica.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Пошук оптимальних режимів руху маніпуляційних систем є актуальними з точки зору енергоефективності та конкурентоздатності подібних технічних систем [1]. Зокрема, вдалий вибір траєкторій руху багатоланкового маніпулятора буде впливати на витрачену його приводом потужність, швидкість виконуваної роботи та продуктивність [2]. Для визначення оптимальних режимів руху маніпуляторів застосовують різні цільові функції. Найбільш доцільними для оптимального енергетичного балансу існуючої механічної системи є функції у виді інтегральних функціоналів з підінтегральними виразами енергетичних витрат [3]. Розв'язок таких задач оптимізації для вантажопідйомних систем виконують варіаційними методами, які дозволяють отримувати гладкі функції керування [4]. Проте, як правило, цільові функції оптимізації зазвичай описуються складними нелінійними залежностями з багатьма незалежними па-

раметрами, що ускладнює пошук екстремумів класичними методиками пошуку [5].

З розвитком комп'ютерної техніки, зокрема з ростом швидкості виконання ними розрахунків, набули розвитку чисельні методи оптимізації на основі генетичних алгоритмів та біологічних систем. Метод рою частинок є одним із багатьох, який використовує інтелектуальний алгоритм оптимізації стану біологічних систем на основі поведінки зграї птахів або комах [6, 7].

МЕТА РОБОТИ

Проаналізувати поведінковий алгоритм оптимізації на основі методу рою частинок та розробити методику його застосування для оптимізації руху механічної системи маніпулятора для роботи за однією з узагальнених координат.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ

Згідно з класичною теорією ройового інтелекту, кожна частинка рою, яка рухається в просторі, описується своїм положенням та швидкістю переміщення. Положення кожної частинки в рої визначає можливий розв'язок оптимізаційної задачі, а оптимізація методом рою частинок (PSO) полягає у визначенні найвигідніших умов існування «зграї» (рою) частинок на площині можливих рішень заданої функціональної залежності [7, 8]. Таким чином, якщо визначити деякий функціонал $I(a_1, a_2, a_3)$ для оптимізаційної задачі, який формалізує властивості системи і залежить від параметрів a_1, a_2, a_3 , тоді завданням рою частинок буде визначення найкращого стану розглядуваної системи за якого вказаний функціонал набуватиме максимального або мінімального значення. Кожна частинка рою описуватиметься вектором з координатами її положення, які відповідатимуть параметрам цільової функції [9]

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

де N – розмірність задачі; τ – момент часу коли розраховується дана точка координат.

Для адекватної роботи даного методу в рою повинно знаходитися Z частинок (1), кожна з яких на початковому етапі розміщується випадковим чином в заданій області пошуку [10]:

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

де a_{k_min} та a_{k_max} – діапазон параметрів для коефіцієнтів цільової функції, яка підлягає оптимізації.

При дослідженні задач оптимізації режимів руху механічних систем таких як вантажопідйомні машини, маніпулятори, роботи, необхідно враховувати, що цільові функції, зазвичай, можуть змінюватися в координаті часу. В такому випадку пошук оптимальних параметрів функціоналу оптимізації можна виконувати на дискретних проміжках часу Δt , які складають пропорційну частину від загального заданого або ж такий параметр часу буде однією з координат частинки рою. В останньому випадку метод рою буде знаходити глобальний екстремум на заданій ділянці переміщення системи, а в першому – локальні екстремуми на кожній з проміжних ділянок часу.

Визначення найкращого положення рою виконується на деякому заданому відрізку дискретного часу, який розділено на n проміжків. 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 [11]:

$$p_i(\tau + \Delta\tau) = p_i(\tau) + v_i(\tau + \Delta\tau). \quad (3)$$

Враховуючи залежність (1), матимемо:

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

$$p_i(\tau + \Delta\tau) = f(a_1(\tau + \Delta\tau), a_2(\tau + \Delta\tau), a_3(\tau + \Delta\tau)), \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_1^i(\tau + \Delta\tau) = a_1^i(\tau) + v_{a_1}^i(\tau + \Delta\tau); \\ a_2^i(\tau + \Delta\tau) = a_2^i(\tau) + v_{a_2}^i(\tau + \Delta\tau); \\ \dots \\ a_N^i(\tau + \Delta\tau) = a_N^i(\tau) + v_{a_N}^i(\tau + \Delta\tau); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_i(\tau + \Delta\tau) = & w_i v_i(\tau) + \\ & + c_1 R_1(p_{best}(\tau) - p_i(\tau)) + \\ & + c_2 R_2(g_{best}(\tau) - p_i(\tau)), \end{aligned} \quad (7)$$

або

$$\begin{cases} v_{a_1}^i(\tau + \Delta\tau) = w_i v_{a_1}^i(\tau) + \\ + c_1 R_1(p_{best_{a_1}}(\tau) - a_1^i(\tau)) + \\ + c_2 R_2(g_{best}(\tau) - a_1^i(\tau)); \\ \dots \\ v_{a_N}^i(\tau + \Delta\tau) = w_i v_{a_N}^i(\tau) + \\ + c_1 R_1(p_{best_{a_N}}(\tau) - a_N^i(\tau)) + \\ + c_2 R_2(g_{best}(\tau) - a_N^i(\tau)), \end{cases} \quad (8)$$

де $p_{best}(\tau)$ – 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.

Як видно із залежності (7), швидкість кожної частинки визначається на основі трьох факторів: інерційної швидкості, яка спонукає частинку продовжити рух та досліджувати нові регіони в області пошуку; «когнітивної» швидкості, яка направляє частинку до її найкращого власного знання; «соціальної» швидкості, яка спрямовує частинку до найкращого стану всього рою.

Рекомендовані значення для коефіцієнта пропорційності w_i інерційної швидкості знаходяться в діапазоні від 0,4 до 0,9 [6]. Проте значення цього коефіцієнта може бути визначено за наступною лінійною залежністю [7]:

$$w_i = (w_{i_min} - w_{i_max}) \frac{n}{Z} w_{i_min}, \quad (9)$$

де w_{i_max} – найбільше значення (рекомендовано приймати 0,9); w_{i_min} – найменше значення, яке на початку пошуку приймається таке як найбільше і поступово з кожним кроком ітерацій зменшується; n – кількість ітерацій.

Коефіцієнти c_1 та c_2 регулюють величини відповідно «когнітивної» та «соціальної» складової швидкостей, які рекомендується приймати однаковими і не більшими від 2 [8, 9].

Виходячи з опису швидкості (4), на початку пошуку частинки активно переміщуватиметься в допустимому просторі рішень за рахунок інерційної компоненти і на її практично не впливатимуть знання про найкращий стан, знайдений сусідніми частинками, тоді як власний найкращий стан матиме певну вагу. Тобто спочатку частинки рою досліджують простір незалежно, але згодом починають все більше брати до уваги результат отриманий сусідніми частинами. В кінця пошуку всі частки переходять до вивчення загального кращого стану.

При визначенні положення частинки за виразом (3) на кожному кроці необхідно перевірити чи знаходиться вона в допустимій області (2). У випадку, якщо координати вектору $p_i(\tau)$ виходять за межі допустимих значень, ці координати приймаються рівними граничному значенню, а компонента швидкості частинки рою ослабляється [10, 11].

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.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянуто динамічну систему стріли маніпулятора з однією ступеню вільності, яка складається зі стійки, стріли, вантажу та приводного виконавчого гідроциліндра (див. Рис. 1).

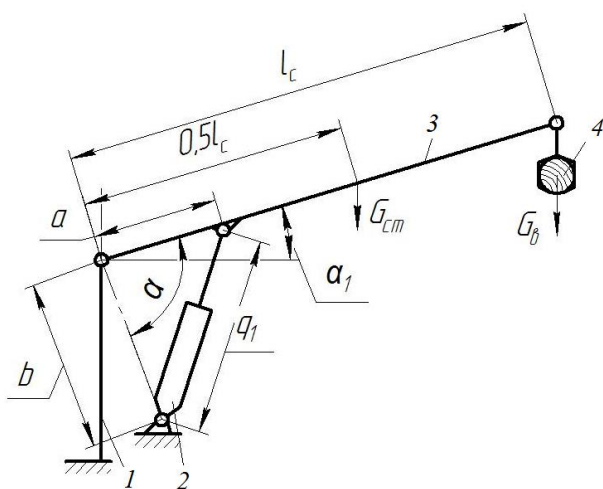


Рис. 1. Динамічна модель маніпулятора з одним ступенем вільності: 1 – стійка; 2 – гідроциліндр; 3 – стріла; 4 – вантаж

Fig. 1. Dynamical model of the manipulator with one degree of freedom: 1 – frame; 2 – hydraulic cylinder; 3 – boom; 4 – cargo load

За узагальнену координату в такій схемі приймається кут повороту α_1 , який може бут визначений також через лінійне переміщення штока гідроциліндра q_1 .

Оптимальний динамічний режим руху розглянутого маніпулятора визначається шляхом мінімізації інтегралу з підінтегральним виразом у виді функції „енергії” прискорень стрілової системи за однієї узагальненої координати [12]:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{2} J_{\Sigma\alpha} \ddot{\alpha}_1^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

де $J_{\Sigma\alpha}$ – зведений до осі повороту стріли момент інерції стрілової системи маніпулятора з вантажем [3]; $\ddot{\alpha}_1$ – кутове прискорення стріли ($\ddot{\alpha}_1 = \frac{d^2\alpha_1}{dt^2}$); t_0, t_1 – час початку та закінчення переміщення стріли.

Наближено прийнято

$$J_{\Sigma\alpha} = \left(\frac{1}{3} m_{cm} + m_b\right) l_{cm}^2, \quad (11)$$

де m_{cm}, m_b – маса стріли та вантажу відповідно; l_{cm} – довжина стріли.

Умовою мінімуму функціонала (10) буде рівняння Ейлера-Пуассона, яке матиме такий вид:

$$IV \quad \alpha_1 = 0. \quad (12)$$

Аналітичний розв’язок рівняння (12) за крайових умов $\alpha_1 = \alpha_{1n}, \dot{\alpha}_1 = 0$ при $t = t_0 = 0$ та $\alpha_1 = \alpha_{1k}, \dot{\alpha}_1 = 0$ при $t = t_1$ буде:

$$\alpha_1(t) = \frac{1}{t_1^3} (-2t^3\alpha_{1k} + 3t^2t_1\alpha_{1k} + 2t^3\alpha_{1n} - 3t^2t_1\alpha_{1n} + t_1^3\alpha_{1n}), \quad (13)$$

де α_{1n}, α_{1k} – початкова та кінцева координата повороту стріли маніпулятора; t_1 – час переміщення.

Даний аналітичний розв’язок задачі мінімізації функціоналу (10) вдалося визначити за рахунок вдалого вибору узагальненої незалежної координати. Подібні випадки при дослідженні маніпуляційних систем зустрічаються не завжди і зазвичай потрібно вирішувати складні нелінійні диференціальні рівняння високих порядків, тому на даному прикладі було проаналізовано можливості застосування універсального методу оптимізації за рахунок ройового інтелекту.

Для розглядуваної схеми маніпулятора досліджено оптимізаційну задачу руху штока лінійного гідроциліндра підйому

стріли. Цільову функцію оптимізації також було визначено у виді критерію „енергії” прискорень, проте визначену через лінійну координату q_1 .

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{2} J_{\Sigma\alpha} \left(\ddot{q}_1 \frac{\partial \alpha_1}{\partial q_1} + \dot{q}_1^2 \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial q_1^2} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

де $\ddot{q}_1 = \frac{d^2 q_1}{dt^2}$ – лінійне прискорення штока

гідроциліндра; $\dot{q}_1 = \frac{dq_1}{dt}$ – швидкість штока;

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial q_1} = - \frac{q_1}{ab \sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - q_1^2)^2}{4a^2 b^2}}};$$

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

a, b – геометричні розміри встановлення гідроциліндра.

Розв’язуючи оптимізаційну задачу (14) варіаційними методами із використанням рівнянь Ейлера-Пуассона зрозуміло, що аналітичне рішення матиме складну форму залежності узагальненої координати від часу. Аналіз подібних задач потребує застосування числових трудомістких розрахункових методів [3]. Таким чином бачимо, що одна і та ж задача оптимізації режиму руху маніпулятора може мати різну природу пошуку рішення, що може залежити від вибору узагальненої координати системи.

Застосовуючи метод рою частинок, розв’язано задачу (14). Для цього спершу дане рівняння перетворено та приведено до простої форми:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{-4q_1(A_1 A_2 \dot{q}_1^2 + q_1 A_1^2 \ddot{q}_1)}{A_1^4} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

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 $t = t_1$.

Розв’язок функціоналу (15) було подано у виді сплайн-функції четвертого порядку:

$$q_1(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4, \quad (16)$$

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

Визначивши першу та другу похідну залежності (16) та прийнявши задані крайові умови, отримано:

$$\dot{q}_1(t) = C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2 + 4C_5 t^3; \quad (17)$$

$$\ddot{q}_1(t) = 2C_3 + 6C_4 t + 12C_5 t^2. \quad (18)$$

Із отриманих виразів знайдено:

$$\begin{cases} C_1 = q_{1n}; \\ C_2 = 0; \\ C_3 = \frac{3}{t_1^2} \Delta q_1 + C_5 t_1^2; \\ C_4 = -\frac{2}{t_1^3} \Delta q_1 - 2C_5 t_1 \end{cases} \quad (19)$$

де $\Delta q_1 = q_{1k} - q_{1n}$.

Із системи рівнянь (16) – (19) очевидно, що функціонал (15) може однозначно визначити сплайн-функцією (16), а пошук мінімуму буде залежити від значень коефіцієнта C_5 сплайн-функції (16). Таким чином було сформовано вид цільової функції для її оптимізації методом рою частинок

$$f_i(C_5) = I(C_5, t), \quad (20)$$

де $I(C_5, t)$ – це значення цільової функції (15) при заданих параметрах C_5 і t .

Рівняння (20) було проаналізовано графічним способом (див. Рис. 2 та Рис. 3) в залежності від зміни C_5 і t за наступних значеннях параметрів системи: $t_0 = 0$; $t_1 = 6$; $a = 0,5$ м; $b = 0,5$ м. Як видно з графіків на Рис. 2 та Рис. 3 зрозуміло, що значення ко-

ефіцієнту C_5 для оптимального випадку не буде постійним. Величина даного коефіцієнту має малий діапазон зміни, який обмежується криволінійною гладкою поверхнею, але незначне відхилення від оптимального значення призводитиме до значної гіперболічної зміни величини цільової функції оптимізації.

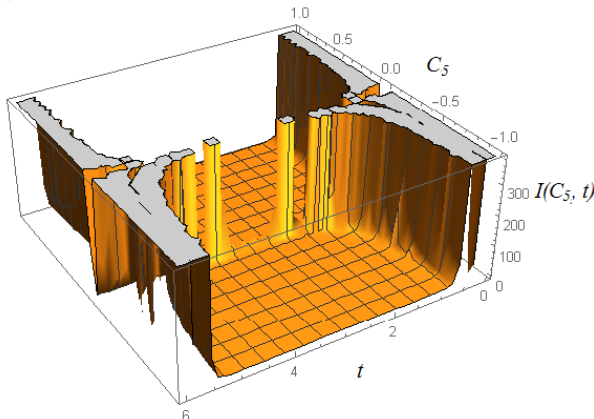


Рис. 2. Значення функції (15) в діапазоні зміни C_5 від -1 до 1

Fig. 2. The value of function (15) in the range of change C_5 from -1 to 1

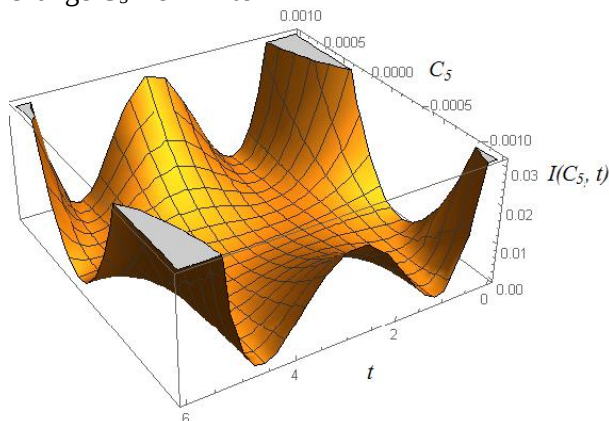


Рис. 3. Значення функції (15) в діапазоні зміни C_5 від -0,001 до 0,001

Fig. 3. The value of function (15) in the range of change C_5 from -0,001 to 0,001

ЧИСЕЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Для чисельної реалізації методу рою використано систему Mathematica. Було прийнято функціональний підхід для моделювання, коли зміна параметрів системи описується користувацькими функціями. Функція алгоритму оновлення значення координати частинки рою та її швидкість показано на Рис. 4.

(* UPDATE POSITION*)

```
update [part_, pbest_, gbest_] := {
  r1 = RandomReal[1];
  r2 = RandomReal[1];
  newVelocity = w*part[[2]]+c1*r1*(pbest-
    part[[1]])+c2*r2*(gbest-part[[1]]);
  newPosition = part[[1]]+newVelocity;
  {newPosition, newVelocity, function[
    newPosition, testT]}
}
```

Рис. 4. Фрейм функції оновлення позиції та швидкості частинки рою в системі Mathematica: part_ – масив в якому першим значенням передається поточна координата частинки рою, а другим значенням є її швидкість; pbest_ – значення найкращого для даної частинки положення; gbest_ – найкраще положення частинки із всіх можливих

Fig. 4. The frame of the update function a position and velocity of the swarm particle in the Mathematica system: part_ – an array in which the first value is the current coordinate of the swarm particle, and the second value is its velocity; pbest_ – the value of the best position for a given particle; gbest_ – the best particle position of all particles

Алгоритм ініціалізації рою та його розрахунок показано на Рис. 5 та Рис. 6.

```
currentTime = 0;
(* INITIALIZATION PARTICLES*)
population = 100;
maxIteration = 3000;
particleMax = 1;
particleMin = -1;
vMax = 0.1*(particleMax-particleMin);
vMin = -0.1*(particleMax-particleMin);
Δp = (particleMax-particleMin)/(population);
Δv = (vMax-vMin)/(population);
w = 0.7; c1=0.1; c2=0.1;
x = Range[particleMin, particleMax, Δp];
v = Range[vMin, vMax, Δv];
particles = {};
pbest = {};
For [i = 1, i < Length[x], i++,
  p = {x[[i]], v[[i]], function[x[[i]], testT]};
  AppendTo[particles, p];
  AppendTo[pbest, {x[[i]], function[x[[i]],
    currentTime]};
]
gbest = MinimalBy[pbest, Last][[1]][[1]];
```

Рис. 5. Фрейм коду ініціалізації параметрів частинки рою в системі Mathematica

Fig. 5. Frame code for initialization of swarm particle parameters in Mathematica system

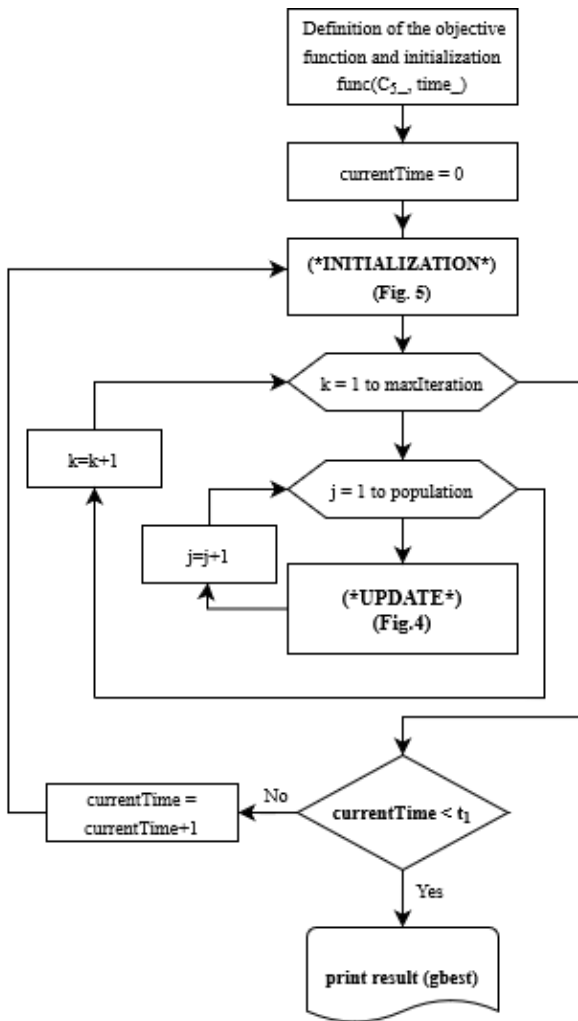


Рис. 6. Загальний алгоритм розрахунку параметрів частинки рою

Fig. 6. General algorithm for calculating the parameters of the swarm particles

На Рис. 5 прийнято такі позначення: population = 100 – кількість частинок; maxIteration = 3000 – кількість ітерацій для кожної частинки; particleMax та particleMin відповідно найбільше та найменше значення яке приймає частинка; vMax, vMin – найбільша і найменша швидкості частинки; x, v – початковий діапазон розподілення положень та швидкостей для частинок рою.

В Таблиці представлено результати моделювання координат частинками рою при автоматичному розрахунку, а також для порівняння показано аналогічні результати при ручному розрахунку графічним способом за графіками з Рис. 2 та Рис. 3.

Таблиця. Результати моделювання параметру C_5 алгоритмом рою частинок

Table. The results of modeling the parameter C_5 algorithm by a swarm of particles

t, c	Автоматичний розрахунок	Ручний розрахунок
	C_5	C_5
0	0,00000	-0,00025
1	-0,00078	-0,00088
2	-0,00023	0,0004
3	0,00000	0
4	-0,00021	-0,0004
5	0,00063	0,00088
6	0,00000	0,00025

Так як отримувана величина коефіцієнту змінюється з плином часу, тоді її функцію зміни було визначено регресійним аналізом за допомогою кубічного сплайну. Залежність зміни коефіцієнта C_5 для даних з автоматичного розрахунку роєм частинок:

$$C_5(t) = -0,00088t + 0,000403t^2 - 0,00004t^3. \quad (21)$$

Залежність зміни коефіцієнта C_5 для даних з ручного розрахунку графічним способом:

$$C_5(t) = -0,00052t + 0,00024t^2 - 0,00002t^3. \quad (22)$$

ОБГОРНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На Рис. 7 представлено графіки зміни узагальненої координати та її швидкості, які отримано з рівнянь (16) та (17) при різних значеннях коефіцієнтів розрахованих відповідно за виразами (21) і (22). З порівняння даних графіків, відмітимо, що метод рою частинок дозволяє визначати параметри режимів руху маніпулятора при його русі за однією з узагальнених координат, проте такий метод розрахунку необхідно застосовувати досить обережно, зокрема необхідно точно визначати початкове по-

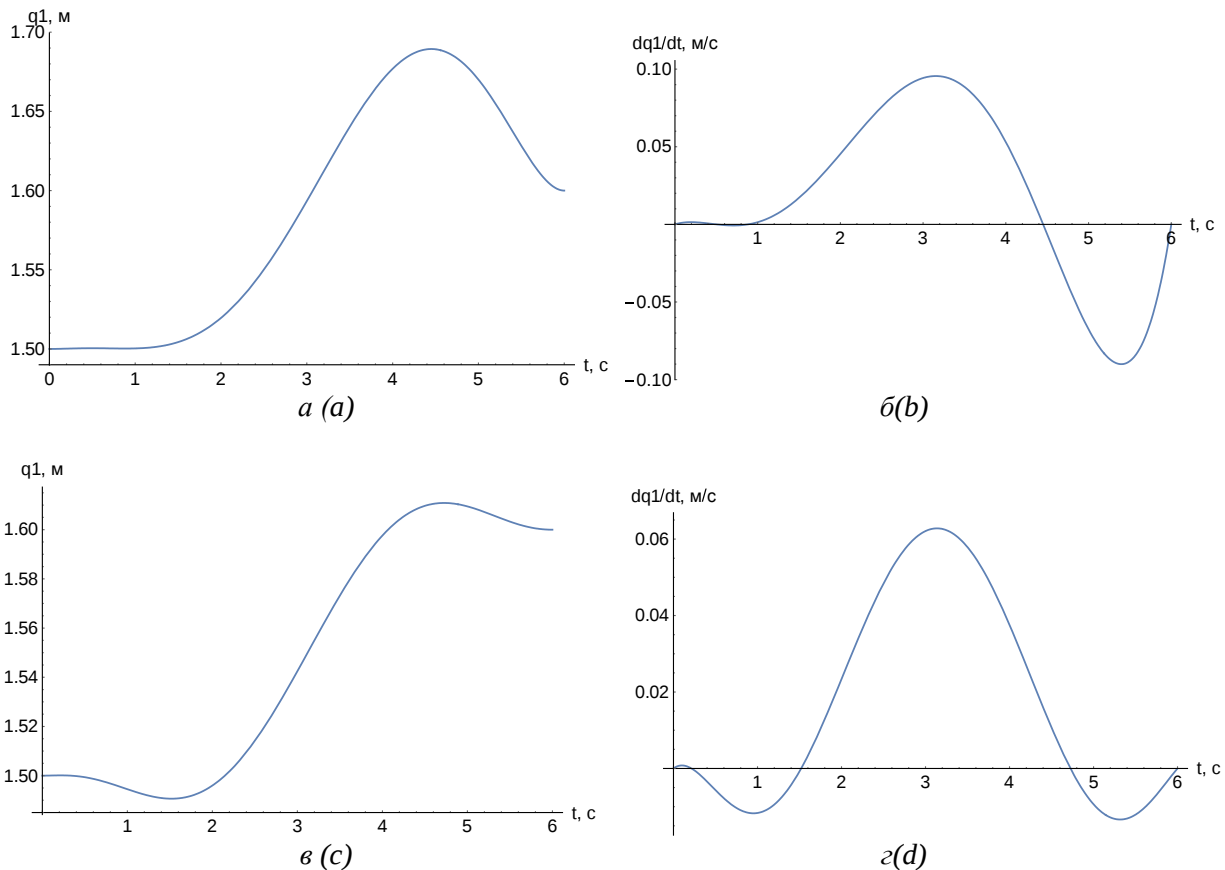


Рис. 7. Графіки переміщення штока (*a, в*) привідного гідроциліндра та зміни його швидкості (*б, г*): *a, б* – для ручного розрахунку; *в, г* – для автоматичного розрахунку методом рою

Fig. 7. Graphs of movement of a rod (*a, c*) of the driving hydraulic cylinder and change of its speed (*b, d*) *a, b* – for manual calculation; *c, d* – for automatic calculation by the swarm method

ложення частинок рою та наперед аналізувати діапазони в яких можуть існувати параметри частини рою. Наприклад, даний метод буде неточним, якщо кількість частинок рою буде малою або діапазон початкових параметрів прийняти занадто великим.

В контексті даного дослідження зрозуміло, що параметр, який визначається знаходиться наближеним до нуля, а отже його можна було б не враховувати. Проте для чистоти експерименту та узагальнення результатів таке допущення не враховувалося.

З графіка на Рис. 7 (*a*) видно, що при ручному графічному визначенні параметрів моделі руху маніпулятора, отримано закон переміщення, який не є оптимальним.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бойченко А.** Возможности использования библиотеки проектирования нейронных сетей TensorFlow для кинематического исследования манипулятора / А. Бойченко, Д. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, – 2020. – №95. – С. 14–24. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.95.0201>.
2. **Демидюк М.** Параметрична оптимізація кінематичної структури та руху дволанкового маніпулятора / М. Демидюк, В. Демидюк // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», – 2020. – Випуск 48, – С. 36–48.
3. **Ловейкін В. С.** Оптимізація режимів зміни вильоту маніпулятора з гідроприводом. Монографія / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук. – Київ: ЦП «Компринт», – 2013. – 206.

4. **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>
5. **Черноусько Ф. Л.** Манипуляторы роботов: Динамика, управление и оптимизация / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник, В. Г. Градетский – М: Наука, – 1989, – 386 с.
6. **Карпенко А. П.** Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, – 2017. – 446 с.
7. **Kennedy J. and Eberhart R. C.** Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. C. Eberhart // In Proceedings of the International Conference on Neural Networks. – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Vol. 4. – 1995. – pp. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
8. **Данішевський В. В., Гайдар А. М.** Метод рою частинок для розв'язання задач нелінійної оптимізації // Вісник Придніпровської державної академії будівництва і архітектури, – 2019, – №6. – С. 18-25.
9. **Vanderbergh F.** A study of particle swarm optimization particle trajectories / F. Vanderbergh, A. Engelbrecht // Inf. Sci. (Ny). – Vol. 176, No 8. – 2006. – P. 937-971.
10. **Hu X.** Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization / X. Hu, R. Eberhart // 6th World Multiconference Syst. Cybern. Informatics. Orlando, Florida, USA, – 2002. – P. 203–206.
11. **Xu Zhaoyue & Du Lin.** Particle swarm optimization-based algorithm of a symplectic method for robotic dynamics and control / Zhaoyue Xu, Lin Du, Haopeng Wang, Zichen Deng // Applied Mathematics and Mechanics. – 2018 – P. 40. <https://doi.org/10.1007/s10483-019-2412-6>.
12. **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.

REFERENCES

1. **Boychenko A., Mishchuk D.** (2020). Possibilities of using the packet TensorFlow neural network design library for the kinematic study of a manipulator. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and melioration machines], (95), 14–24. – (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.95.0201>
2. **Demydyuk Myroslav & Vitalii Demydiuk.** (2020). Parametric optimization of the kinematic structure and the movement of the two-link manipulator. *Bulletin of Kharkiv National University named after VN Karazin, series "Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems"*, Issue 48, 36-48 – (in Ukrainian).
3. **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. – (in Ukrainian).
4. **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 melioration machines], (90), 34–41. – (in Ukrainian). <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/143520>
5. **Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N., Gradetskii V. G.** (1989). *Robot Manipulators: Dynamics, Control, and Optimization*, Moscow, Nauka, 386. – (in Russian).
6. **Karpenko A. P.** (2017). *Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a textbook*, Moscow, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 446.
7. **Kennedy J., Eberhart R. C.** (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*; Institute of Electrical and Electronics Engineers. Vol. 4, 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
8. **Danishvsky V. V., Gaidar A. M.** (2019). Particle swarm method for solving nonlinear optimization problems. *Bulletin of the Dnieper State Academy of Civil Engineering and Architecture*, No.6, 18-25.
9. **Vanderbergh F., Engelbrecht A.** (2006). A study of particle swarm optimization particle trajectories. *Inf. Sci. (Ny)*. Vol. 176, No 8, 937–971.

10. **Hu X., Eberhart R.** (2002). Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization. 6th World Multi-conference Syst. Cybern. Informatics. Orlando, Florida, USA, 203–206.
11. **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>.
12. **Lovejkin V. S., Mishuk D. O.** (2009). Viznachennya 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).

Research of the particle swarm method in the problem of optimizing the mode of motion of the manipulator along one of the generalized coordinates

*Dmytro Mishchuk¹, Yevhen Mishchuk²,
Ievgenii Gorbatyuk³*

*Kyiv National University of
Construction and Architecture*

Abstract. The problems of optimizing the modes of movement of mechanical systems, in

particular robots and manipulators, is relevant in the context of modern society. Algorithms for optimal movements of components of robots and manipulators allow to realize complex trajectories of movements of their working bodies with predicted energy consumption, positioning accuracy, speed. Finding optimal modes of motion is a complex task that requires accurate formulation of the optimization function, constraint equations and determination of optimal laws that would meet the criteria of the optimization problem. In this article, the classical particle swarm method for finding the optimal mode of motion of the manipulator boom at one of the generalized coordinates was analyzed. The target energy function is the "energy" of the accelerations of the mechanical system, and the search for the optimal law of displacement was carried out using a fourth-order polynomial.

The theoretical study showed that the method of particle swarm can be used to find the optimal laws of motion, but when working with this method it is necessary to modernize the algorithm for determining its components, including particle velocity and their correction factors.

In determining the optimal laws of motion of the manipulator by the swarm method, this study uses an approach where it is assumed that time is discrete, and the value of the objective function was determined only at the accepted sampling points of time.

Keywords: particle swarm method, control system, optimization, manipulator, generalized coordinates, Mathematica.