

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-27>

УДК 681.5:629.3

СЕМЕНИШЕН Андрій
Хмельницький національний університет
СОКОЛАН Юлія
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>
sokolan.julia@gmail.com
МАЙДАН Павло
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>
maidanps@gmail.com
МАКАРИШКІН Денис
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0000-3447-811X>
makaryshkinde@khmnu.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА PANDA ARM

При використанні роботів-маніпуляторів на підприємствах актуальною є задача визначення оптимальних параметрів функціонування роботів-маніпуляторів, які б враховували параметри його функціонування, а саме відсутність перешкод на траєкторіях руху, безпека працівників, які працюють поблизу робота-маніпулятора та мінімальне споживання енергії при виконанні технологічного процесу.

В процесі виконання роботами-маніпуляторами поставлених задач в рамках технологічного процесу наявна велика кількість можливих параметрів його функціонування, до яких відносяться, наприклад, траєкторія руху, координати, при яких відбувається захоплення об'єктів, тощо. В роботі розглядається множина можливих траєкторій руху робота при підйомі об'єктів з коробок та їх подальшого переміщення на конвеєр. Траєкторії руху отримані шляхом створення віртуального прототипу робота та розраховані методом параболічного змішування.

Отримані траєкторії руху були проаналізовані з точки зору споживання енергії. В результаті було встановлено, що зменшення довжини лінійної траєкторії руху робота призводить до збільшення енергоспоживання; зменшення вигину суглобів при руху по траєкторії призводить до зменшення енергоспоживання; найменше енергії потребує двигун першого суглоба; основну частку серед спожитої енергії має саме сумарна довжина траєкторії руху, пройденої всіма суглобами робота-маніпулятора; довжина лінійної траєкторії руху робота-маніпулятора не значним чином впливає на підйом об'єктів, тому її можна розглядати лише в розрізі енергоспоживання.

Ключові слова: робот-маніпулятор, Panda Arm, цифровий двійник, метод параболічного змішування, рекурсивний алгоритм Ньютона-Ейлера, перетворення Лагранжа, оптимальні параметри, мінімальне енергоспоживання.

SEMENYSHEN Andriy, SOKOLAN Iuliia, MAIDAN Pavlo, MAKARYSHKIN Denys
Khmelnitskyi National University

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE PANDA ARM ROBOT MANIPULATOR

When using robotic manipulators at enterprises, the task of determining the optimal parameters of robotic manipulators that would take into account the parameters of its functioning, namely the absence of obstacles on the trajectories of movement, the safety of workers working near the robotic manipulator and the minimum energy consumption during the technological process, is relevant.

In the process of performing tasks by robotic manipulators within the technological process, there are a large number of possible parameters of its functioning, which include, for example, the trajectory of movement, the coordinates at which objects are captured, etc. In this paper, we consider a set of possible trajectories for a robot to follow when picking up objects from boxes and moving them to a conveyor. The motion trajectories were obtained by creating a virtual prototype of the robot and calculated by the parabolic mixing method.

The resulting motion trajectories were analyzed in terms of energy consumption. As a result, it was found that reducing the length of the linear trajectory of the robot's movement leads to an increase in energy consumption; reducing the bending of the joints when moving along the trajectory leads to a decrease in energy consumption; the motor of the first joint requires the least energy; the main share of the energy consumed is the total length of the trajectory traversed by all the joints of the robot manipulator; the length of the linear trajectory of the robot manipulator does not significantly affect the lifting of objects, so it can be considered only in terms of energy consumption.

Keywords: robotic manipulator, Panda Arm, digital twin, parabolic mixing method, recursive Newton-Euler algorithm, Lagrange transform, optimal parameters, minimum power consumption.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОКІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

В процесі виконання роботами-маніпуляторами поставлених задач в рамках технологічного процесу наявна велика кількість можливих параметрів його функціонування, до яких відносяться, наприклад, траєкторія руху, координати, при яких відбувається захоплення об'єктів, тощо. В основному на траєкторії руху робота-маніпулятора можуть утворюватись перешкоди, такі як інші об'єкти на конвеєрі, власне площина конвеєра, а також працівники, особливо якщо робот використовується на напівавтоматизованому підприємстві.

Слід відзначити, що для виконання певного технологічного процесу траєкторія руху робота може мати різні динамічні параметри, до яких відносяться швидкість та прискорення по траєкторії. Кінематичні параметри робота при цьому залишаються незмінними. Досягненню кожного із можливих динамічних параметрів робота властивий різний рівень енергоспоживання, оскільки двигуни на конструктивних ланках працюють за різних умов.

Таким чином, актуальною стає задача визначення оптимальних параметрів функціонування роботів-маніпуляторів, які б враховували ряд факторів, а саме:

- відсутність перешкод на траєкторіях руху;
- безпека працівників, які працюють поблизу робота-маніпулятора;
- мінімальне споживання енергії при виконанні технологічного процесу.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі розглядається модель цифрового двійника робота-маніпулятора Panda Arm. Franka Emika Panda (рис. 1) -це робот-маніпулятор, який має 7 осей та працює на відстані до 850 мм із навантаженням до 3 кг [1]. Вартість Panda Arm в Україні становить 868 тис. грн [2].

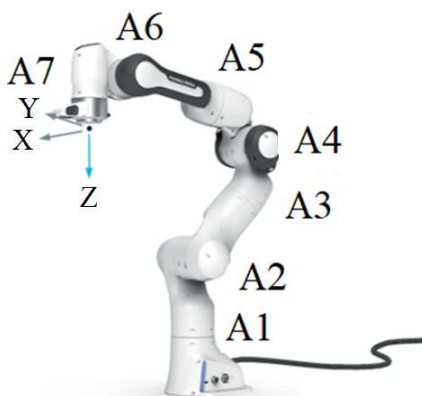


Рис. 1. Робот-маніпулятор Panda Arm

Як видно з рис. 1, основними суглобами, в яких відбувається переміщення робота та його рух по траєкторії, є другий та четвертий суглоби. Центр координат відповідає місцю кріплення об'єктів, а зміщення прийнято виражати в декартовій системі як відхилення по осям x , y , z .

В роботі [3] було проведено розрахунок параметрів цифрового двійника робота-маніпулятора Panda Arm, при чому траєкторія руху розраховувалась методом параболічного змішування, який був розроблений Кунцем та Стілманом [4], а енергоспоживання – перетворенням Лагранжа та рекурсивним алгоритмом Ньютона-Ейлера [5,6].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: визначення оптимальних параметрів функціонування робота-маніпулятора Panda Arm при виконанні технологічного процесу підйому об'єктів та їх переміщення на конвеєр.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для проведення оцінки функціональних можливостей Panda Arm було створено його віртуальний прототип в середовищі Unity (рис. 2). Цей віртуальний прототип є складовою модулю, за допомогою якого проводилась оцінка функціональності. В загальному архітектура модулю наведена на рис. 3.



Рис. 2. Робот-маніпулятор Panda Arm в програмному середовищі Unity

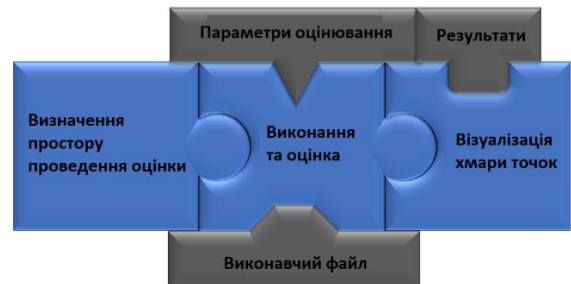


Рис. 3. Архітектура системи оцінки Panda Arm

Для проведення моделювання руху робота-маніпулятора по всім можливим траєкторіям використовувались математичні залежності, які описані в роботі [2]. Після цього отримані результати всіх можливих конфігурацій робота представлялись у вигляді хмари точок для їх подальшої оцінки та виокремлення оптимальних результатів.

Як приклад функціонування робота-маніпулятора було обрано достатньо типовий технологічний процес підйому об'єктів із коробок за допомогою робота та їх подальшого переміщення на конвеєр. Модель такого виробничого підприємства наведена на рис. 4. Також було додано умову, що поблизу може знаходитись працівник, тобто робот при проходженні по траєкторії повинен уникати зіткнення із працівником.

Крім того, процес підйому об'єктів передбачався із двох достатньо поширених конфігурацій коробок. Моделі цих коробок наведені на рис. 5, які умовно отримали назву коробки із простою геометрією (зліва) та коробки із складною геометрією (справа).

Початковою точкою для оцінки імітаційної моделі функціонування Panda Arm буде збір вмісту коробок. Така робота передбачає рух по складним траєкторіям. Генерація траєкторій руху по серії точок проводиться у декартовому просторі.

Підйом об'єктів з конвеєра за допомогою робота-маніпулятора передбачає проведення оцінки різних позицій Panda Arm між конвеєром та коробкою. При установці робота-маніпулятора занадто далеко або занадто близько до коробки може призвести до того, що Panda Arm не зможе виконати повний цикл своєї роботи. Слід відзначити, що різні положення робота можуть збільшувати ймовірність утворення зіткнень на траєкторії його руху. Як додатковий елемент можна провести оцінку між різними геометриями коробки та власне здатністю Panda Arm дістатися до об'єктів, які знаходяться всередині коробки.

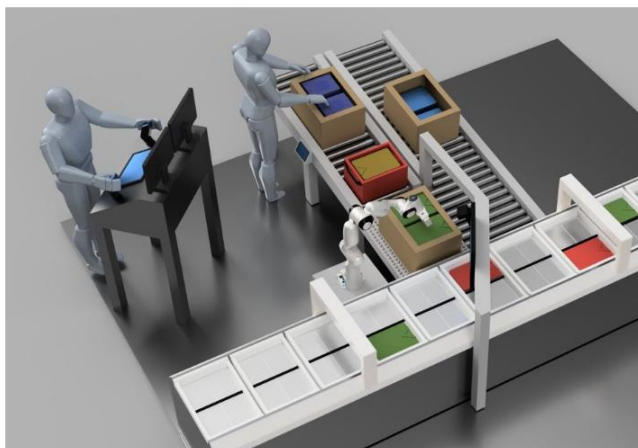


Рис. 4. Приклад підприємства, яке використовувалось для моделювання Panda Arm

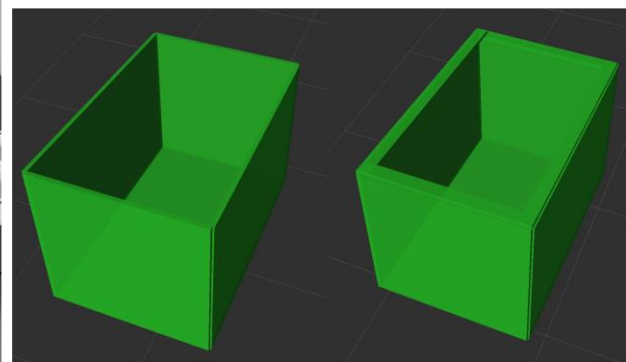


Рис. 5. Проста (зліва) та складна (справа) геометрії коробок, які використовувались при моделюванні

На рис. 6 наведені всі можливі координати робота-маніпулятора, при яких може відбуватись технологічний процес, зображений на рис. 4. Діапазон значень по осям були обрані із врахуванням

правильного положення робота-маніпулятора в межах простору підприємства без можливого зіткнення з перешкодами.

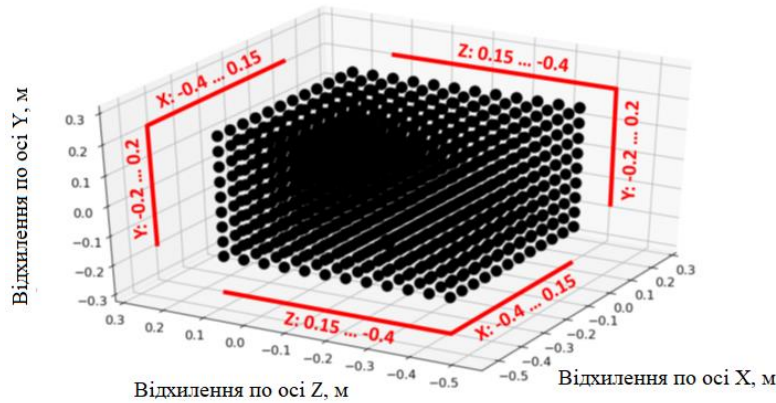


Рис. 6. Координати руху робота-маніпулятора на промисловому підприємстві в процесі підйому вмісту коробки з консерва

При проведенні оцінки впливу параметрів функціонування робота-маніпулятора на енергоспоживання основними параметрами були динамічні параметри другого та четвертого суглобів, траєкторія руху, виражена в сумарному згині кута цих суглобів, загальна довжина траєкторії руху, швидкість проходження по траєкторії, а також час виконання операції (сумарний час руху по траєкторії та підйому вмісту коробки). Позначались такі параметри q_2 [2] та q_4 [4] для другого та четвертого суглобів відповідно. Отримані залежності наведені на рис. 7 та 8.

На всіх траєкторіях, які були змодельовані, найменша відстань становить $s_j = 177,5^\circ$ при значеннях $q_2[4] = 0^\circ, q_2[2] = 0^\circ$, а найбільша відстань, яку проходить робот становить $s_j = 590,2^\circ$ при значеннях $q_2[4] = -100^\circ, q_2[2] = 140^\circ$. Слід відзначити, що траєкторія, якій характерна найбільша відстань (найбільша довжина) відповідає тій траєкторії руху, при якій досягається максимальне значення енергоспоживання ($E_{el} = 109,95$ Вт · с). Аналогічним чином, траєкторія із найменшою загальною відстанню, тобто найменшою довжиною, відповідає траєкторії із найменшим споживанням енергії ($E_{el} = 19,46$ Вт · с).

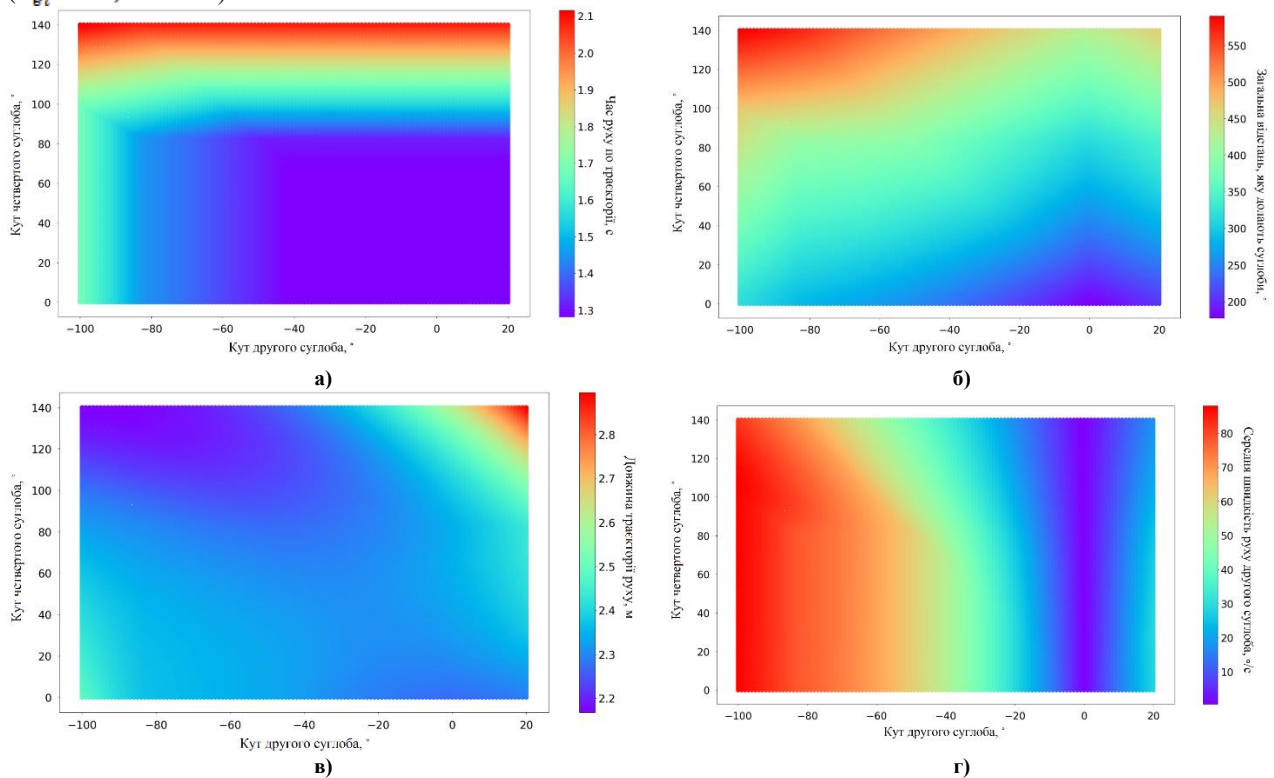


Рис. 7. Отримані залежності впливу параметрів Panda Arm на енергоспоживання: а – час руху по траєкторії; б – сумарний згин суглобів; в – сумарна довжина траєкторії; г – середня швидкість проходження траєкторії

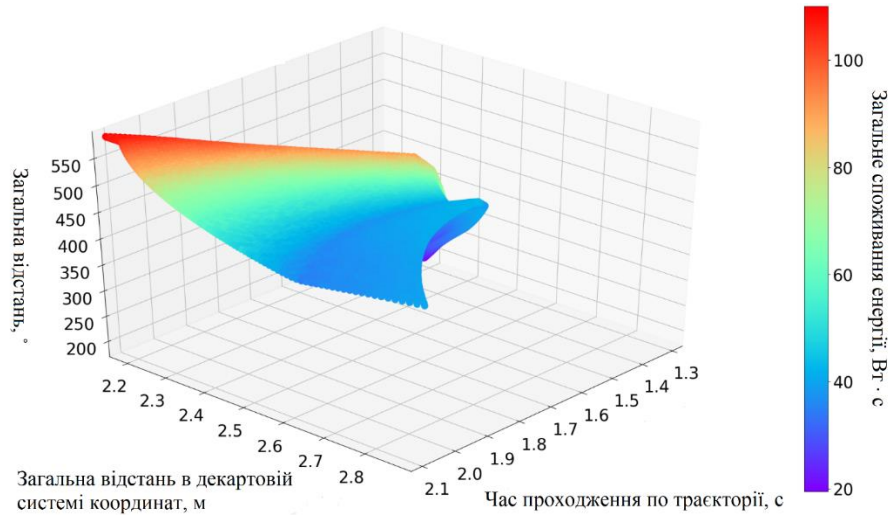


Рис. 8. Споживання енергії при проходженні всіх змодельованих траєкторій

Максимальне споживання енергії досягається при виконанні роботом-маніпулятором рухів, які відповідають куту 400° або більше. При цьому на певному значенні досягається стрімке зростання енергоспоживання. Наприклад, при проходженні суглобами загального кута $428,8^\circ$ споживання енергії становить $E_{el} = 34,42$ Вт · с, а при значенні 429° споживання енергії стрімко зростає до $100,21$ Вт · с.

Аналогічним чином розглядалось споживання електричної енергії в розрізі проходження загальної відстані, яку можна виразити в метрах, а не в куті згину суглобів. Ці залежності показані на рис. 4.6. При значеннях $q_2[4] = 140^\circ, q_2[2] = -100^\circ$ робот Panda Arm проходить найменшу відстань в метрах, яка становить $s_{dec} = 2,17$ м. На відміну від суглобової відстані, яка виражається в загальному куті згину, мінімальному значенню декартової відстані відповідає найвище споживання енергії, яке становить $E_{el} = 110,02$ Вт · с. При цьому спостерігається зворотна залежність, оскільки мінімальному значенню енергоспоживання відповідає максимальне значення відстані, яку проходить робот-маніпулятор, а саме $E_{el} = 39,86$ Вт · с при $s_{dec} = 2,90$ м. Ці значення досягаються при $q_2[4] = 140^\circ, q_2[2] = 20^\circ$.

Після аналізу змодельованих даних можна зробити висновок, що найбільш оптимальним значенням відстані в розрізі мінімального енергоспоживання стане траєкторія руху, яка має загальну довжину $2,27$ м. Мінімальні та максимальні значення параметрів наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Граничні значення траєкторій руху Panda Arm

Назва параметру	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення	
			Мін.	Макс.
Кут четвертого суглоба	$q_2[4]$	°	0	140
Кут другого суглоба	$q_2[2]$	°	-100	20
Час виконання траєкторії	t	°/с	78,5	129,5
Середня швидкість суглоба 1	$q_{сер}[1]$	°/с	0,8	120,3
Середня швидкість суглоба 2	$q_{сер}[2]$	°/с	0,5	88
Середня швидкість суглоба 4	$q_{сер}[4]$	°/с	0,8	120,3
Загальна довжина	s_{dec}	м	2,17	2,9
Загальний вигин суглобів	s_j	°	177,5	590,2
Енергоспоживання суглоба 1	$E_{el}[1]$	Вт · с	5,08	40,27
Енергоспоживання суглоба 2	$E_{el}[2]$	Вт · с	4,78	63,88
Енергоспоживання суглоба 4	$E_{el}[4]$	Вт · с	1,31	35,64
Загальне енергоспоживання	E_{el}	Вт · с	19,46	110,02

Проведення оцінки процесу підйому об'єктів із коробок, які рухаються по конвеєру, за допомогою Panda Arm буде використовуватись з точки зору проведення оцінки позиціонування робота-маніпулятора. Для цього необхідно провести визначення позицій робота-маніпулятора, при яких він здатен виконувати технологічний процес, передбачений на промисловому підприємстві. Для успішного виконання процесу підйому об'єктів із коробок з конвеєрної лінії необхідно, щоб робот пройшов всі маршрутні точки p_i в кількості семи штук, при чому без зіткнень, тобто $i \in \{1 \dots 7\}$.

На рис. 9 показано здатність робота-маніпулятора повністю виконати процес підйому об'єктів із коробки на конвеєрній лінії. Цей процес був змодельований для всіх позицій робота, які відповідають змінним зміщення по координатам x , y , z . Червоним кольором позначені позиції, при яких процес збору об'єктів із коробок був проведений успішно, в той час як всі можливі процеси збору, включаючи помилкові та ті, які мали на своїх траєкторіях руху потенційні зіткнення, показані фіолетовим кольором. В рамках створення імітаційної моделі слід враховувати, що розглядаються дві різні геометрії коробок – проста та складна.

При моделюванні часу виконання траєкторії при підйомі об'єктів з коробки із простою геометрією було отримано достатньо широкий діапазон значень, який показаний на рис. 4.15. Мінімальний час виконання процесу становив 11,94 с при положенні Panda Arm $x_p = 0$ м, $y_p = 0,05$ м, $z_p = -0,05$ м. Максимальний час виконання при цьому становив 19,39 с при параметрах $x_p = 0$ м, $y_p = -0,05$ м, $z_p = 0,1$ м.

Якщо провести порівняння із підйомом об'єктів з коробки із складною геометрією, то мінімальний час виконання процесу становив 12,9 с при положенні Panda Arm $x_p = -0,1$ м, $y_p = 0,1$ м, $z_p = 0$ м. Максимальний час виконання при цьому становив 17,46 с при параметрах $x_p = 0$ м, $y_p = 0,1$ м, $z_p = 0$ м.

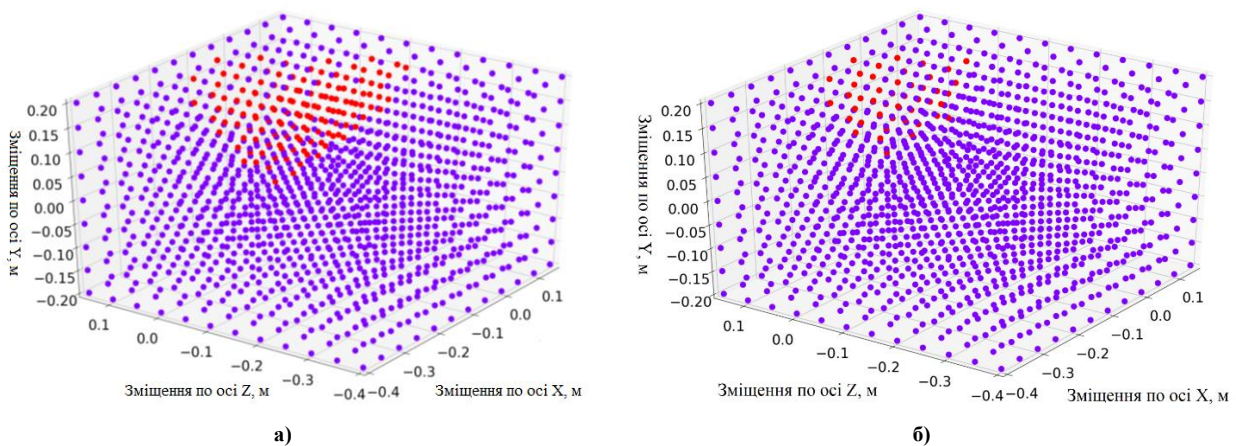
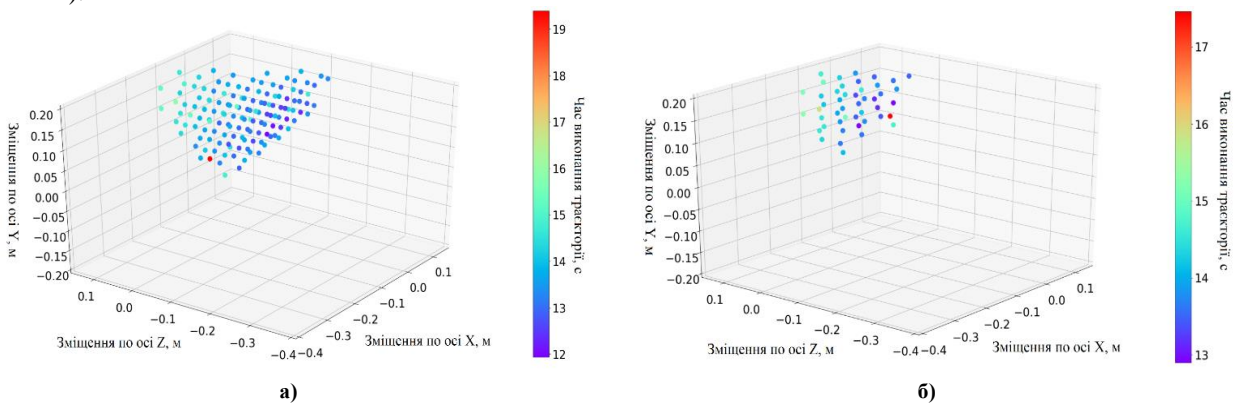


Рис. 9. Тривимірне відображення всіх можливих траєкторій при підйомі об'єктів з коробок (фіолетові – проблемне виконання, червоні – успішне виконання):
 а – проста геометрія коробки; б – складна геометрія коробки

В процесі моделювання функціонування Panda Arm під час підйому об'єктів з коробок виконувалось моделювання ще й загального часу виконання підйому та переміщення об'єктів наряду із моделюванням та розрахунком траєкторій руху, загальна довжина яких розраховувалась в метрах та в загальній зміні куту суглобу. В процесі оцінки було змодельовано час виконання траєкторії руху при підйомі об'єктів із коробки зі складною геометрією. Результати такого моделювання для траєкторій, на яких відсутні зіткнення, показані на рис. 10.

На основі отриманих залежностей можна встановити граничні значення параметрів Panda Arm (табл. 2).



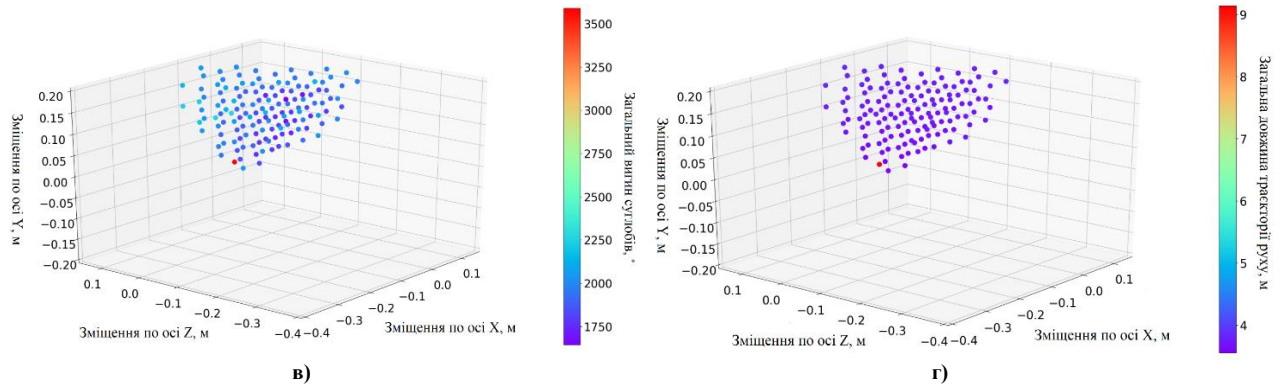


Рис. 10. Параметри функціонування Panda Arm
(а – час виконання траєкторії (проста геометрія); б - час виконання траєкторії (складна геометрія);
в – загальний вигин суглобів; г – загальна довжина траєкторії)

Таблиця 2.

Граничні значення траєкторій руху Panda Arm

Назва параметру	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення	
			Мін.	Макс.
Проста геометрія коробки				
Довжина траєкторії	S_{dec}	м	3,56	9,14
Час виконання траєкторії	t	с	11,94	19,39
Загальний вигин суглобів	S_j	°	1643,9	3590,3
Складна геометрія коробки				
Довжина траєкторії	S_{dec}	м	3,64	4,84
Час виконання траєкторії	S_j	с	1836,3	3031,0
Загальний вигин суглобів	t	°	12,9	17,46

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В статті наведені результати моделювання траєкторій руху Panda Arm при підйомі об'єктів з коробок та їх подальшого переміщення на конвеєр. Ці траєкторії руху моделювались для двох можливих геометрій коробок. Створені траєкторії були проаналізовані з точки зору можливих зіткнень із іншими об'єктами. Такі хибні траєкторії були відсіяні та не приймали участь у подальшому аналізі.

Отримані траєкторії руху були проаналізовані з точки зору споживання енергії. В результаті було встановлено, що:

- зменшення довжини лінійної траєкторії руху робота призводить до збільшення енергоспоживання;
- зменшення вигину суглобів при руху по траєкторії призводить до зменшення енергоспоживання;
- найменше енергії потребує двигун першого суглоба;
- основну частку серед спожитої енергії має саме сумарна довжина траєкторії руху, пройденої всіма суглобами робота-маніпулятора.

Крім того, при аналізі процесу підйому об'єктів із коробок встановлено наступне:

- довжина лінійної траєкторії руху робота-маніпулятора не значним чином впливає на підйом об'єктів, тому її можна розглядати лише в розрізі енергоспоживання;
- визначені параметри, при яких досягається мінімальний час підйому об'єктів із коробок, а саме $x_p = -0,1$ м, $y_p = 0,1$ м, $z_p = 0$ м для коробок із складною геометрією та $x_p = 0$ м, $y_p = 0,05$ м, $z_p = -0,05$ м для коробок із простою геометрією.

Література

1. Franka Emika Panda Arm. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://robodk.com/robot/ru/Franka/Emika-Panda>
2. Колаборативний робот Franka Emika Panda. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://hydrolider.com.ua/ua/p595553818-kollaborativnyj-robot-franka.html?srsItd=AfmBOoqAsVdUBwSS87m1QK2_bnrmsZ5hkDx4uH3-OzjC4cDM14ycUdDe
3. Семенишен А.Л. Модель цифрового двійника робота-маніпулятора Panda Arm / А.Л. Семенишен, Ю.С. Соколан, П.С. Майдан, Д.А. Макаришкін. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - №4 (2024). - с. 207-214

-
4. Kunz. Turning paths into trajectories using parabolic blends / T. Kunz, M. Stilman. - Georgia Institute of Technology. – 2011. -213 p.
 5. Featherstone R. Inverse dynamics — the recursive Newton-Euler method / R. Featherstone // Robot Dynamics Algorithms. - Boston, MA: Springer US. – 1987. – pp. 65-77
 6. Ang. M.H. Encyclopedia of Robotics / M.H. Ang, O. Khatib, B. Siciliano. – Living reference work. – 2020. – 623 p.

References

1. Franka Emika Panda Arm. [Electronic resource]. – Access mode: <https://robodk.com/robot/ru/Franka/Emika-Panda>
2. Collaborative robot Franka Emika Panda. [Electronic resource]. – Access mode: https://hydrolider.com.ua/ua/p595553818-kollaborativnyj-robot-franka.html?srsId=AfmBOoqAsVdUBwSS87m1QK2_bnrmsZ5hkDx4uH3-OzjC4cDM14ycUdDe
3. Semenyshe A.L. Model of the digital twin of the Panda Arm robot-manipulator / A.L. Semenyshe, Y.S. Sokolan, P.S. Maidan, D.A. Makaryshkin. - Measuring and computing equipment in technological processes. - №4 (2024). - c. 207-214
4. Kunz. Turning paths into trajectories using parabolic blends / T. Kunz, M. Stilman. - Georgia Institute of Technology. – 2011. - 213 p.
5. Featherstone R. Inverse dynamics — the recursive Newton-Euler method / R. Featherstone // Robot Dynamics Algorithms. - Boston, MA: Springer US. – 1987. – pp. 65-77
6. Ang. M.H. Encyclopedia of Robotics / M.H. Ang, O. Khatib, B. Siciliano. – Living reference work. – 2020. – 623 p.