

УДК 621.869.8

RESEARCH OF THE WORKSPACE OF SPECIALIZED ROBOTIC COMPLEXES FOR GROUP PACKAGING OF FOOD PRODUCTS

I. Hlushchenko, M. Iakymchuk*National University of Food Technologies***Key words:**

specialized robotic complexes,
workspace,
articulated robots,
group packaging,
decomposition,
mathematical modeling,
MatLab,
Autodesk Inventor

Article history:

Received 05.09.2024
Received in revised form
18.09.2024
Accepted 24.09.2024

Corresponding author:

ivanhlush@ukr.net

ABSTRACT

The use of specialized robotic complexes (SRC) in packaging equipment has demonstrated its effectiveness and potential. However, the application of robotic complexes (RC) in packaging equipment remains at a relatively low level compared to other industries, and SRCs themselves require further optimization. One of the key parameters for optimization is the shape and size of the SRC's workspace. The purpose of this study is to examine modern SRCs in group packaging equipment and apply the proposed methodology for studying the workspace of existing SRCs as one of the key optimization parameters of RCs.

An analysis of scientific studies dedicated to researching the workspace of RCs revealed a significant number of such studies. However, most of these studies are conducted without considering the context of technological processes in packaging equipment. A market study of packaging equipment identified 10 different companies that manufacture and integrate SRCs into their own packaging equipment. An analysis of the use of such SRCs in packaging equipment identified typical technological processes where SRCs are utilized, as well as their technical characteristics.

Further research on the working zones of planar articulated SRCs was conducted using the proposed methodology, which is based on the decomposition of video materials of SRCs operation, modeling of the workspace, and verification of the obtained results using MatLab and Autodesk Inventor software. Thus, the proposed methodology allows for the study of existing SRCs and the modeling of workspace at the early stages of SRC design, and can be used for further research.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-13

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

І. С. Глущенко, аспірант, ORCID ID: 0009-0009-8303-5623
М. В. Якимчук, д-р. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-1905-3546
Національний університет харчових технологій

Використання спеціалізованих роботизованих комплексів (СРК) довело свою ефективність, однак використання роботизованих комплексів у пакувальному обладнанні все ще знаходиться на низькому рівні порівняно з іншими галузями промисловості, а самі СРК потребують подальшої оптимізації. Одним із ключових параметрів оптимізації є форма та розміри робочої зони СРК. На основі аналізу зразків сучасного пакувального обладнання та існуючих наукових праць, присвячених темі дослідження, пропонується методика, що дасть змогу моделювати та досліджувати робочі зони СРК ще на ранніх етапах їх проектування.

Ключові слова: спеціалізовані роботизовані комплекси, робоча зона, шарнірні роботи, групове пакування, декомпозиція, математичне моделювання, MatLab, Autodesk Inventor.

Вступ. Промислові роботи вже зарекомендували себе, як невід’ємний елемент Індустрії 4.0 для харчової промисловості [1, 2]. Інтегрування промислових роботів у технологічні процеси харчової промисловості підвищує гігієнічність виробництва та його гнучкість, збільшує продуктивність і швидкість переналадження.

Попри перелічені переваги, інтегрування промислових роботів у харчову промисловість в Україні все ще знаходиться на низькому рівні [3] через ряд стримуючих факторів, серед яких брак висококваліфікованого обслуговуючого персоналу та висока вартість роботизованих комплексів (РК) [4].

Відповідно до проведеного аналізу відомих конструкцій РК у харчовій промисловості [2, 5] можна стверджувати, що широкі застосування знайшли шарнірні роботи, порталні роботи, роботи із замкнутим кінематичним ланцюгом (дельта-роботи) та SCARA-роботи [4]. Результат аналізу технічних характеристик таких роботів в обладнанні для групового пакування наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики різних типів промислових роботів для операцій групового пакування

Тип РК	Шарнірний	Дельта	Портальний	SCARA
Робоча зона	Сферична	Напів-сферична	Прямокутна	Циліндрична
Переваги	Швидкість Гнучкість Велика робоча зона Вантажо-підйомність	Швидкість Точність Гнучкість Мала вага	Вантажопідйомність Жорсткість конструкції Точність Низька вартість	Швидкість Точність Мала вага Малі габарити
Недоліки	Великі габарити Висока вартість	Обмежена робоча зона	Складне обслуговування Обмежена робоча зона Обмежена гнучкість	Обмежена вантажопідйомність Обмежена робоча зона

Продовження таблиці 1

Застосування	Укладання одиночної/ряду /шару споживчої упаковки	Укладання одиночної споживчої упаковки	Укладання одиночної/ряду /шару споживчої упаковки	Укладання одиночної споживчої упаковки
--------------	---	---	--	--

Варто підкреслити, що подальше використання СРК у технологічному обладнанні для групового пакування дасть змогу:

- здешевити технологічне обладнання для групового пакування за рахунок оптимізації кількості ступенів вільності порівняно з використанням універсальних РК;
- збільшити надійність і ремонтпридатність СРК на рівні підприємств;
- полегшити інтегрування СРК у технологічне обладнання.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У праці [6] розглядаються проблеми оптимізації та максимізації робочої зони дволанкового плоского РК. Для вирішення цих проблем побудована математична модель на основі рішення прямої задачі кінематики РК за допомогою програмного забезпечення MatLab, після чого був визначений діапазон кутових переміщень і побудовані робочі зони для різних варіацій довжин ланок (рис. 1) [6]. У результаті було визначено, що розміри ланок плоского шарнірного РК в різній мірі впливають на розміри та форму робочої зони РК.

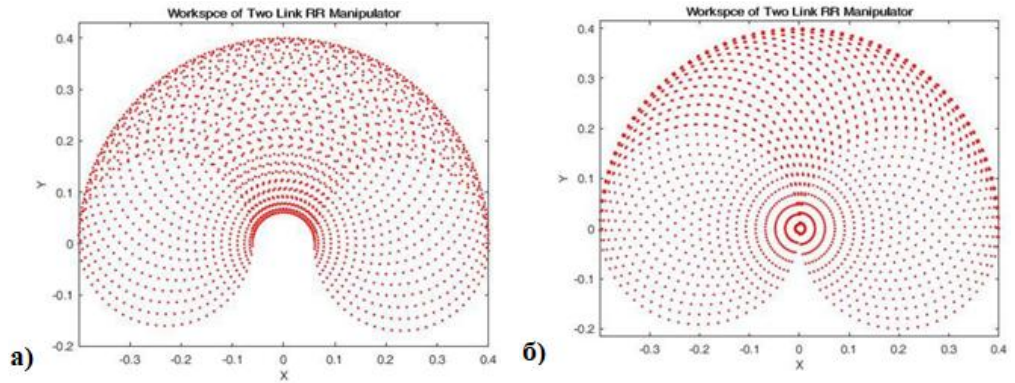


Рис. 1. Дослідження робочої зони плоского СРК із двома ступенями вільності для різних конфігурацій довжин ланок: а, б

У праці [7] досліджується одна із прикладних проблем використання РК, зокрема обмеження, що накладаються на теоретичну робочу зону залежно від орієнтування захоплюючого пристрою.

Автори розкривають необхідність врахування впливу орієнтувальних ступенів вільності на функціональну робочу зону, що відрізняється від теоретичної (рис. 2) [7]. Для вирішення цієї задачі пропонується використати аналітичний і геометричний метод.

Як показали результати дослідження, геометричний метод є більш простим для моделювання просторової робочої зони та проведення обробки отриманих результатів з використанням програмного забезпечення MatLab.

Досліджуючи робочу зону РК дельта типу із 6 ступенями вільності, автори наводять математичну модель, що дає змогу змінювати вхідні параметри для моделювання робочої зони та виводити результати у вигляді тривимірного масиву точок у програмному забезпеченні MatLab (рис. 3) [8].

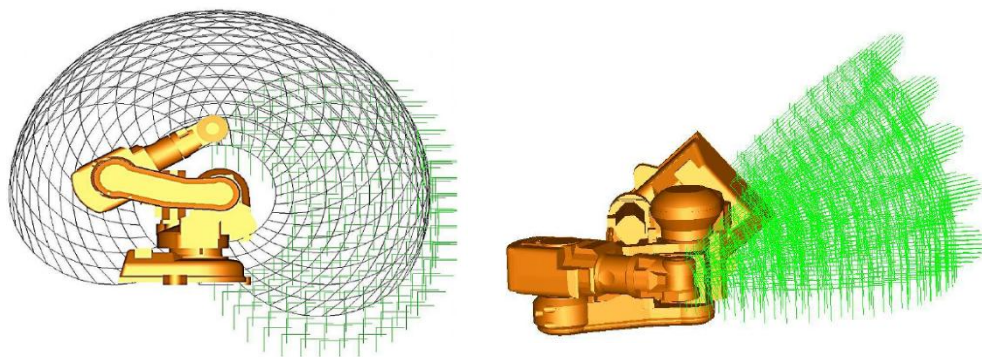


Рис. 2. Дослідження робочої зони універсального РК із 6 ступенями вільності

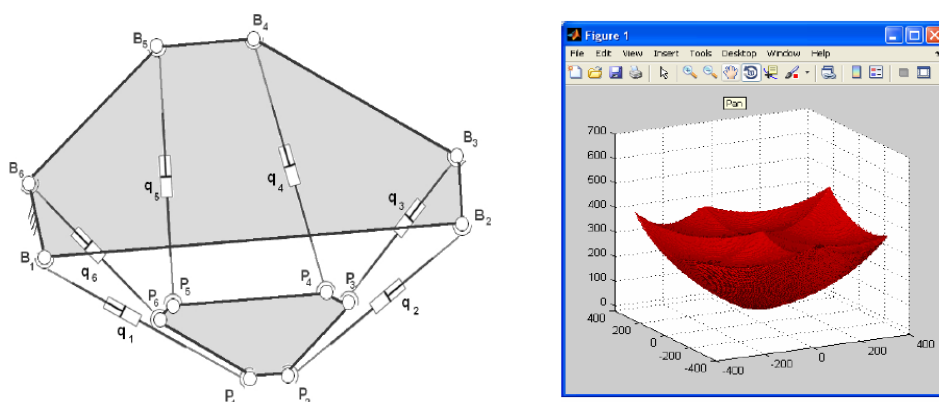


Рис. 3. Дослідження робочої зони універсального РК дельта типу із 6 ступенями вільності

Аналіз існуючих наукових досліджень показав, що в основному приділяється увага універсальним РК та, меншою мірою, спеціалізованим РК. Також варто відмітити, що більшість досліджень робочих зон РК використовували сучасні програмні комплекси для математичного та графічного моделювання. До основних недоліків можна віднести: дослідження робочої зони у відриві від контексту технологічного обладнання, а також відсутність методів верифікації отриманих результатів моделювання робочої зони. Також варто зауважити, що часто відсутність технічних даних про робочі зони СРК від виробників технологічного обладнання призводить до неможливості якісної оцінки СРК шляхом порівняння робочих зон різних СРК.

З огляду на це **метою пропонованої статті** є розробка методики для визначення робочої зони плоских спеціалізованих РК шарнірного типу.

Предметом дослідження є форма та розміри робочої зони спеціалізованих роботизованих комплексів (СРК) залежно від їх конструкції та розмірів ланок.

Методами дослідження є аналіз і декомпозиція відеоматеріалів роботи СРК, математичне та графічне моделювання в програмному забезпеченні MatLab і САПР Autodesk Inventor.

Дослідження та аналіз ринку обладнання для групового пакування дозволило виявити виробників, що виробляють СРК та інтегрують їх у власне пакувальне обладнання, серед яких варто відмітити: Schubert Group, Krones, Douglas Machinery, CAMA GROUP.

Характерною особливістю таких виробників є те, що вони розробляють лінійки СРК, які можна адаптувати під різноманітні технологічні операції.

Результати дослідження. За результатами аналітичного дослідження технічних характеристик СРК (табл. 2) можна стверджувати, що широке застосування знайшли СРК шарнірного типу, що працюють у площині та мають 2—3 ступені вільності, для операцій укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки та виділення масиву плоскоскладених заготовок. Також широко використовуються РК дельта типу, що мають просторову робочу зону, що забезпечується чотирма ступенями вільності і, зазвичай, використовується для операцій поштучного укладання продукції за рахунок високої продуктивності.

Таблиця 2. Технічні характеристики СРК

№	Модель РК-обладнання	Загальний вигляд	Тип РК	Ступінь вільності	Технологічний процес	Метод встановлення
1.	Schubert F4		SCARA	4	Укладання одиничної споживчої упаковки	Підвісний
2.	Schubert F2		Шарнірний	2	Укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки Виділення масиву плоскоскладених заготовок	Підвісний
3.	Krones Robobox T-GS		Дельта	4	Палетування	Підвісний
4.	Douglas CpONE		SCARA	3	Виділення плоскоскладених заготовок	На підлогу
5.	Cama Triaflex Delta Robot		Дельта	4	Укладання одиничної споживчої упаковки	Підвісний
6	Cama 2 Axis Robot		Шарнірний	2	Укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки Виділення масиву плоскоскладених заготовок	Підвісний

Виробники перелічених СРК у складі пакувального обладнання, зазвичай, не вказують характеристики робочої зони, тому для визначення форми та розмірів робочої зони плоских СРК залежно від геометричних розмірів ланок і кутів їх повороту була запропонована методика (рис. 4).



Рис. 4. Методика визначення робочої зони СРК

Використання запропонованої методики для визначення робочої зони СРК показано на прикладі обладнання для групового пакування *TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery*.

Крок 1. Декомпозиція відеоматеріалів роботи СРК. Для виконання цього кроку слід зазначити, що за відеоматеріалами роботи технологічного обладнання неможливо визначити реальні лінійні розміри об'єкта, що допоміг би обрахувати масштабний коефіцієнт і дав змогу визначити лінійні розміри ланок СРК. Тож через відсутність реальних розмірів ланок пропонується прийняти умовний розмір ланок (рис. 5) зі збереженням їх пропорцій. Такий підхід дасть змогу описати характерну геометрію робочої зони РК без прив'язки до реальних розмірів.

Для визначення величин кутових переміщень ланок за відеоматеріалами роботи РК необхідний прямий кут спостереження, що мінімізує спотворення кутових величин необхідних для визначення кутових переміщень ланок. Отримані розміри ланок і значення кутових переміщень ланок використовуються для математичного моделювання робочої зони.

Крок 2. Створення розрахункової схеми СРК. Розрахункова схема представляє спрощену модель СРК, де зображуються ланки і кінематичні пари за попередньо визначеними розмірами. Далі ланки розташовуються в крайніх положеннях відповідно до значень кутів θ_1 , θ_2 та вимірюються координати точки кінцевої ланки. Для створення розрахункової схеми достатньо створити двовимірний ескіз в САПР Autodesk Inventor в САПР за визначеними параметрами кутових переміщень і довжин

ланок. Необхідність створення розрахункової схеми полягає у верифікації результатів моделювання робочої зони в програмному забезпеченні MatLab.



Рис. 5. Приклад декомпозиції відео роботи СРК TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery та визначення кутів повороту і розмірів ланок

Крок 3. Моделювання робочої зони СРК. Для моделювання робочої зони використаємо матрицю Денавіта-Хартенберга [9, 10] та за допомогою математичного апарату MatLab розв'яжемо пряму задачу кінематики робота.

Результатом розв'язку є функція зміни координат захоплювального пристрою СРК від кутових переміщень ланок, яку використаємо для отримання масиву точок захоплюючого пристрою в системі координат XZ (рис. 6).

Крок 4. Перевірка. Адекватність моделювання робочої зони СРК перевіряється шляхом порівняння координат точок захоплювального пристрою в крайніх положеннях робочої зони на отриманому графіку (рис. 6) в програмному забезпеченні MatLab та розрахунковій схемі в САПР Autodesk Inventor.

Результати моделювання робочих зон за запропонованою методикою для різних СРК подані в табл. 3.

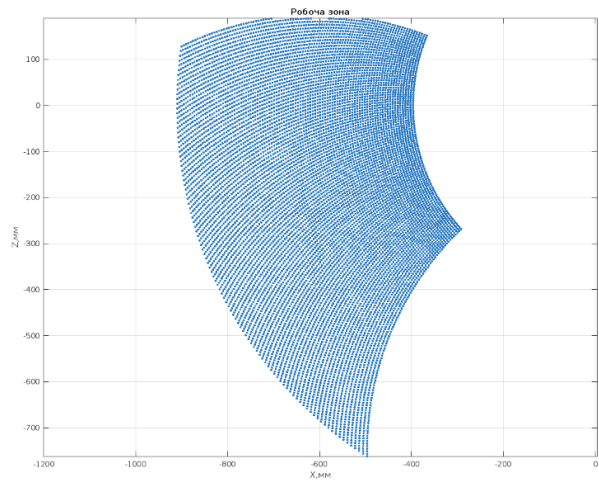
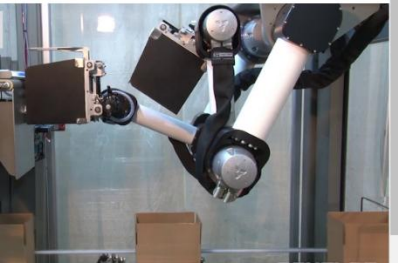
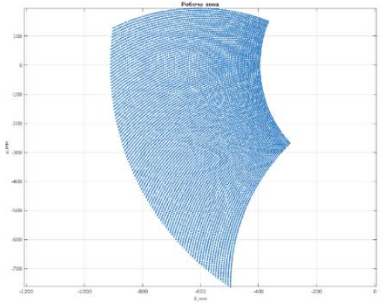
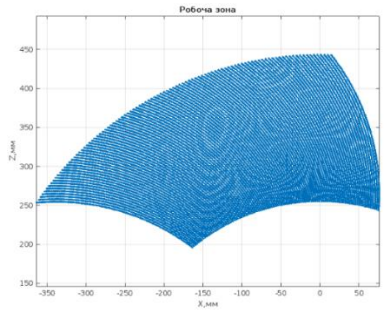
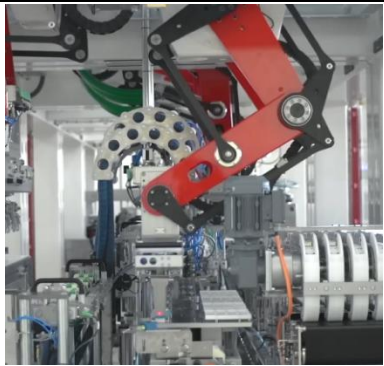
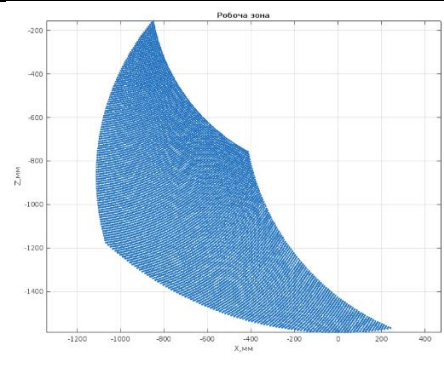
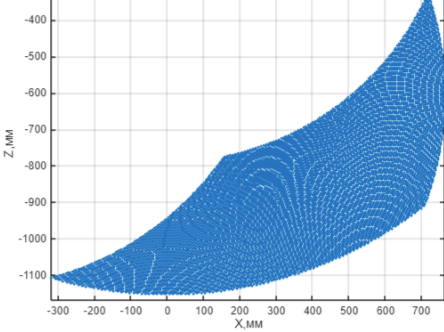
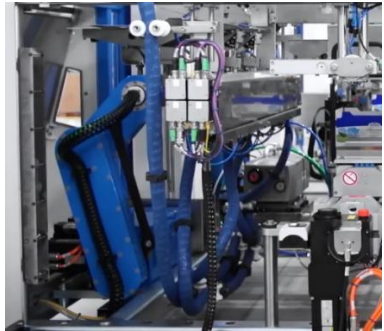
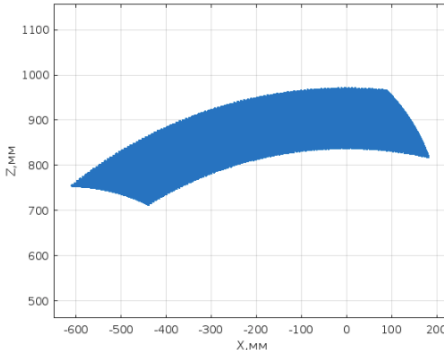
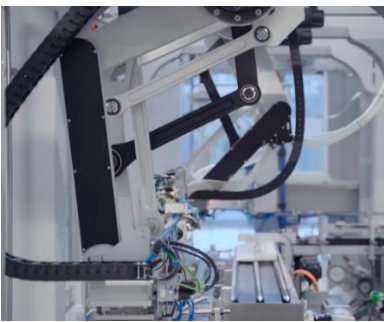
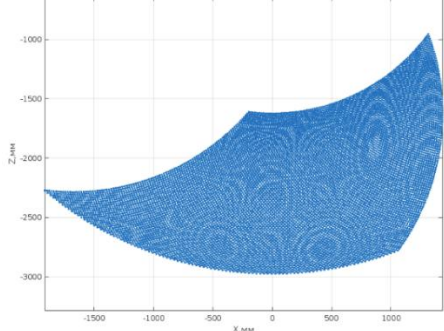


Рис. 6. Результат моделювання робочої зони СРК TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery в програмному забезпеченні MatLab

Таблиця 3. Результати моделювання робочої зони СРК

Модель РК-обладнання	Загальний вид СРК	Результати моделювання робочої зони в MatLab
TRIVEX® SL & Sli		
СрONE™		

Продовження таблиці 3

SCHUBERT TLM F2		
SCHUBERT TLM F2		
SCHUBERT TLM F3		
IG 273 CAMA GROUP		

Висновки. За результатом проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- існує тенденція до створення СРК для пакувального обладнання, що підтверджується постійним розвитком і вдосконаленням конструкцій таких СРК;
- аналіз існуючих досліджень робочих зон плоских СРК шарнірного типу виявив, що розміри ланок таких РК різною мірою впливають на форму та розміри робочої зони СРК;
- типовими технологічними процесами в пакувальному обладнанні, де використовуються СРК є поштучне, рядне та пошарове укладання продукції, поштучне та виділення шару плоскоскладених заготовок і палетування;
- встановлено, що найчастіше в обладнанні для групового пакування харчових продуктів застосовуються СРК шарнірного та SCARA типу;
- запропонована методика (рис. 4) дає змогу визначити форму та розміри робочої зони на основі декомпозиції відеоматеріалів роботи СРК і математичного моделювання в програмному забезпеченні Autodesk Inventor та MatLab;
- порівняння результатів графічного моделювання робочої зони СРК із вказаними робочими зонами виробників СРК показали відхилення в межах 5%

ЛІТЕРАТУРА

1. Bader, F., Rahimifard, S. (2020). A methodology for the selection of industrial robots in food handling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102379>.
2. Elferink, M., & Schierhorn, F. (2016, April 7). Global demand for food is rising. Can we meet it? *Harvard Business Review*, 94(4), 2—5.
3. Rene, J., Moreno Masey John, O., Gray Tony, J., Dodd Darwin, G., Caldwell. (2010). Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry, *Industrial Robot: An International Journal*, 37(6), 509—517. <http://dx.doi.org/10.1108/01439911011081650>.
4. Bader, F., & Rahimifard, S. (2018). Challenges for Industrial Robot Applications in Food Manufacturing. 1—8. 10.1145/3284557.3284723.
5. Buckenhüskes, H. J., & Oppenhäuser, G. (2014). DLG-Trendmonitor: roboter in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, DLG trend report: robots in the food and beverage industry. *DLG Lebensmittel*, 9(6), 16—17.
6. Thu, Z., Phyto Wai, L., Dr. Su Yin, W. (2019). Workspace Analysis of Two-link Planar Manipulator. 10.7753/IJSEA0808.1028.
7. Gudla, Arun Gowtham. (2012). A methodology to determine the functional workspace of a 6R robot using forward kinematics and geometrical methods. *Electronic Theses and Dissertations*. 4809. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/4809>.
8. Lapusan, C., & Maties, V., & Olimpiu, H. (2009). Workspace analysis and design of a 6-DOF parallel robot.
9. Jazar, R. N. (2007). *Theory of Applied Robotics; Kinematics, Dynamics, and Control*, 1st ed., Springer US.
10. Вігуро, М., & Маляр, А. (2021). Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи. *Журнал електроенергетичні та електромеханічні системи*. 27—34. 10.23939/sepes2021.01.027.
11. Ковальов, Ю. А., Кошель, С. О., Манойленко, О. П. (2020). *Проектування промислових роботів та маніпуляторів: навчальний посібник*. Київ: Центр учбової літератури.
12. Пелевін, Л. Є., Почка, К. І., Гаркавенко, О. М., Міщук, Д. О., Русан, І. В. (2016). *Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник*. К.: ТОВ «НВП «Інтерсервіс».