

ПОЛИЩУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: andrepol215@gmail.com**ГАРБАР ЄВГЕН**<https://orcid.org/0000-0001-6952-4855>e-mail: garbarzhenia@gmail.com**ПОЛИЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: opolishchuk71@gmail.com**ДУКА ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-8231-856X>e-mail: s4n1220@gmail.com**ГЕРГЕЛЬ МАРІУШ**

Гірничо-металургійна академія в Кракові

<https://orcid.org/0000-0002-4212-1113>e-mail: giergiel@agh.edu.pl

МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА ROBODK ТА РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

У статті розглянуто методіку моделювання та симуляції процесу лазерного гравіювання із застосуванням програмного середовища RoboDK. Використання роботизованих систем у виробничих процесах дозволяє підвищити точність обробки матеріалів, зменшити витрати та мінімізувати ймовірність помилок. Одним із ключових аспектів впровадження таких технологій є попереднє цифрове тестування, що дозволяє оптимізувати параметри траєкторій руху маніпуляторів та перевірити їхню ефективність без необхідності фізичного втручання в обладнання. У межах дослідження реалізовано алгоритм створення віртуального середовища у RoboDK, що включає імпорт САД-моделей, налаштування координатних систем, калібрування інструменту та побудову оптимальної траєкторії лазерного гравіювання. Використання моделювання дає можливість оцінити можливі зіткнення, визначити допустимі діапазони руху маніпулятора та адаптувати параметри лазерного променя відповідно до особливостей оброблюваної поверхні. Реалізовано тестування роботизованого маніпулятора, оснащеного лазерною голівкою, що дозволило здійснити оцінку стабільності системи та відповідності заданої траєкторії. Впроваджено комплексний підхід до аналізу кінематики руху маніпулятора, що включає дослідження впливу швидкості, прискорення та кута нахилу на точність нанесення гравіювання. Проведена симуляція дозволила визначити оптимальні режими роботи лазерної системи, а також скоригувати параметри керування для мінімізації похибок. Отримані результати демонструють доцільність застосування RoboDK для попереднього тестування та налагодження технологічних процесів лазерного гравіювання. Використання симуляції дозволяє значно скоротити час на розробку та налаштування виробничого процесу, зменшити ризики помилок та підвищити якість кінцевого виробу. Запропонований підхід може бути використаний для вдосконалення алгоритмів керування роботизованими маніпуляторами в інших сферах виробництва, що потребують високої точності та стабільності виконання операцій.

Ключові слова: RoboDK, лазерне гравіювання, роботизована система, моделювання, симуляція, робот-маніпулятор, роботизована рука.

POLISHCHUK ANDRII, HARBAR YEVHEN, POLISHCHUK OLEH, DUKA OLEKSANDR

Khmelnitskyi National University

GIERGIEL MARIUSZ

AGH University of Krakow

MODELING OF LASER ENGRAVING OPERATION USING THE ROBODK SOFTWARE ENVIRONMENT AND A ROBOT MANIPULATOR

The article discusses the methodology for modeling and simulating the laser engraving process using the RoboDK software environment. The use of robotic systems in production processes allows you to increase the accuracy of material processing, reduce costs and minimize the likelihood of errors. One of the key aspects of implementing such technologies is preliminary digital testing, which allows you to optimize the parameters of the manipulator motion trajectories and check their effectiveness without the need for physical intervention in the equipment. As part of the study, an algorithm for creating a virtual environment in RoboDK was implemented, which includes importing CAD models, setting coordinate systems, calibrating the tool and building the optimal laser engraving trajectory. The use of modeling makes it possible to assess possible collisions, determine the permissible ranges of manipulator motion and adapt the laser beam parameters in accordance with the characteristics of the surface being processed. Testing of a robotic manipulator equipped with a laser head was implemented, which allowed assessing the stability of the system and compliance with the given trajectory. A comprehensive approach to the analysis of the kinematics of the manipulator movement was implemented, which includes a study of the influence of speed, acceleration and tilt angle on the accuracy of engraving. The simulation made it possible to determine the optimal operating modes of the laser system, as well as adjust the control parameters to minimize errors. The results obtained demonstrate the feasibility of using RoboDK for preliminary testing and debugging of laser engraving technological processes. The use of simulation allows you to significantly reduce the time for developing and setting up the production process, reduce the risk of errors and increase the quality of the final product. The

proposed approach can be used to improve the control algorithms of robotic manipulators in other areas of production that require high accuracy and stability of operations.

Keywords: RoboDK, laser engraving, robotic system, modeling, simulation, robot manipulator, robotic arm.

Вступ

Планування та оптимізація виробничих процесів є критично важливими для підвищення ефективності підприємств. Зростаюча конкуренція, необхідність підвищення продуктивності та зниження витрат вимагають від виробничих компаній впровадження сучасних технологічних рішень [1]. Одним із найефективніших методів досягнення цих цілей є інтеграція роботизованих систем, що забезпечують автоматизацію ключових виробничих етапів [2]. Завдяки сучасним технологіям, таким як цифрове моделювання та програмна симуляція, підприємства можуть попередньо тестувати технологічні процеси, виявляти можливі недоліки та вдосконалювати виробничі стратегії ще до їх впровадження [3].

Одним з основних викликів автоматизації є точне налаштування параметрів руху роботизованих маніпуляторів, їх взаємодія з об'єктами робочої зони та контроль виконання заданих операцій [4]. Лазерне гравіювання є технологічним процесом, який вимагає високої точності, оскільки навіть найменші відхилення у траєкторії руху можуть суттєво вплинути на якість нанесеного малюнка або маркування. Для вирішення цих завдань необхідні інструменти, що дозволяють проводити попереднє моделювання та симуляцію процесів, що мінімізує ризик помилок і забезпечує максимальну точність виконання [5].

Програмне забезпечення RoboDK є потужним інструментом для створення та тестування сценаріїв роботи роботизованих систем без необхідності фізичного втручання у виробничий процес. Це дозволяє значно скоротити витрати на експериментальні налаштування, оптимізувати маршрути руху, виявити можливі зіткнення та внести коригування ще до фактичного запуску системи [4]. Крім того, використання RoboDK спрощує інтеграцію роботизованих маніпуляторів з різними інструментами, такими як лазерні головки, що дозволяє створювати універсальні автоматизовані комплекси для різних типів виробничих операцій.

Застосування роботизованих систем з програмним моделюванням є особливо актуальним у галузевому машинобудуванні та легкій промисловості. У машинобудуванні автоматизовані системи дозволяють досягти високої точності обробки деталей, знизити рівень браку та прискорити виробничий процес. Лазерне гравіювання застосовується для нанесення маркувань, ідентифікаційних кодів та декоративних елементів, що є важливим для якості продукції та її відповідності стандартам. У легкій промисловості роботизовані технології відкривають нові можливості для автоматизації художнього оформлення матеріалів, персоналізації товарів та покращення дизайну текстильних виробів. Використання роботизованих систем у цих сферах дозволяє мінімізувати виробничі витрати, підвищити продуктивність та забезпечити стабільну якість продукції.

Таким чином, застосування цифрових технологій для попереднього тестування та налаштування обладнання є важливим фактором успішної автоматизації. Використання RoboDK у процесах лазерного гравіювання дозволяє не лише підвищити якість обробки, але й забезпечити стабільність роботи роботизованої системи. Це відкриває нові можливості для оптимізації виробництва, зменшення витрат і підвищення продуктивності підприємства.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес лазерного гравіювання, змодельований у середовищі RoboDK. Методологія базується на створенні віртуального робочого середовища, імпорту CAD-моделей, визначенні параметрів лазерної головки та тестуванні траєкторії руху.

Постановка завдання

Основним завданням є створення моделі процесу лазерного гравіювання та визначення ефективності симульованого робочого середовища. Дослідження передбачає: розробку та інтеграцію лазерної головки у RoboDK; створення траєкторії руху для гравіювання на складних поверхнях, аналіз можливих зіткнень та перевірка ефективності моделювання.

Результати та їх обговорення

Створення сцени в RoboDK є важливим етапом проектування технологічного процесу, що дозволяє змодельовати робоче середовище для точного відтворення та тестування функціоналу роботизованих систем. На початковому етапі необхідно імпортувати тривимірні моделі робочих елементів, деталей обладнання, інструментів та самого робота. Для цього використовується формат САD-файлів, що дозволяє зберігати точні геометричні характеристики та параметри кінематичних зв'язків [4]. RoboDK підтримує імпорт з різних програм САD, таких як SolidWorks, AutoCAD, Fusion 360 та інші, що забезпечує гнучкість у проектуванні [6].

Після імпорту моделі розташовуються у віртуальному просторі, визначаються їхні орієнтації та задаються координатні системи. Це дозволяє правильно позиціонувати всі компоненти виробничої зони, враховуючи робочий простір маніпулятора та можливі обмеження руху. Для забезпечення високої точності моделювання додаються об'єкти робочої зони: столи, конвеєри, захисні елементи, кріплення та додаткові аксесуари. RoboDK має інструменти для налаштування логічної взаємодії між об'єктами, що дає змогу точно проектувати динаміку процесу.

У дослідженні розглядається робочий простір, у якому розташовано робот-маніпулятор. В якості робота-маніпулятора було вибрано роботизовану руку Niryu One, яка є високоточним компактним пристроєм, здатним виконувати складні маніпуляції з високою повторюваністю рухів [7]. Ця модель відрізняється гнучкістю налаштувань, що дозволяє ефективно інтегрувати її в середовище RoboDK для моделювання та симуляції виробничих процесів. Niryu One має розширений робочий простір та підтримує різні типи інструментів, зокрема лазерні головки для гравіювання. Завдяки високій точності та швидкому налаштуванню координатної системи, цей маніпулятор забезпечує стабільність та ефективність виконання технологічних операцій, що є ключовим фактором для якісного гравіювання на складних поверхнях.

До робочого простору інтегровано спеціалізований інструмент – лазерну головку, що не входить до стандартної бібліотеки RoboDK. Лазерний інструмент було спроектовано в CAD-системі, а саме в програмному середовищі SolidWork, яке забезпечує широкий набір інструментів для точного тривимірного моделювання [8]. У процесі проектування було визначено ключові параметри інструменту, зокрема його геометричні характеристики. Використання SolidWorks дозволило детально опрацювати конструкцію інструменту, провести аналіз міцності та оптимізувати його конфігурацію для подальшої інтеграції в RoboDK. Після завершення розробки 3D-модель була експортована у форматі *stp*, сумісному з RoboDK, що забезпечило коректне відображення її просторового розташування та подальше налаштування для симуляції процесу гравіювання (рис.1).

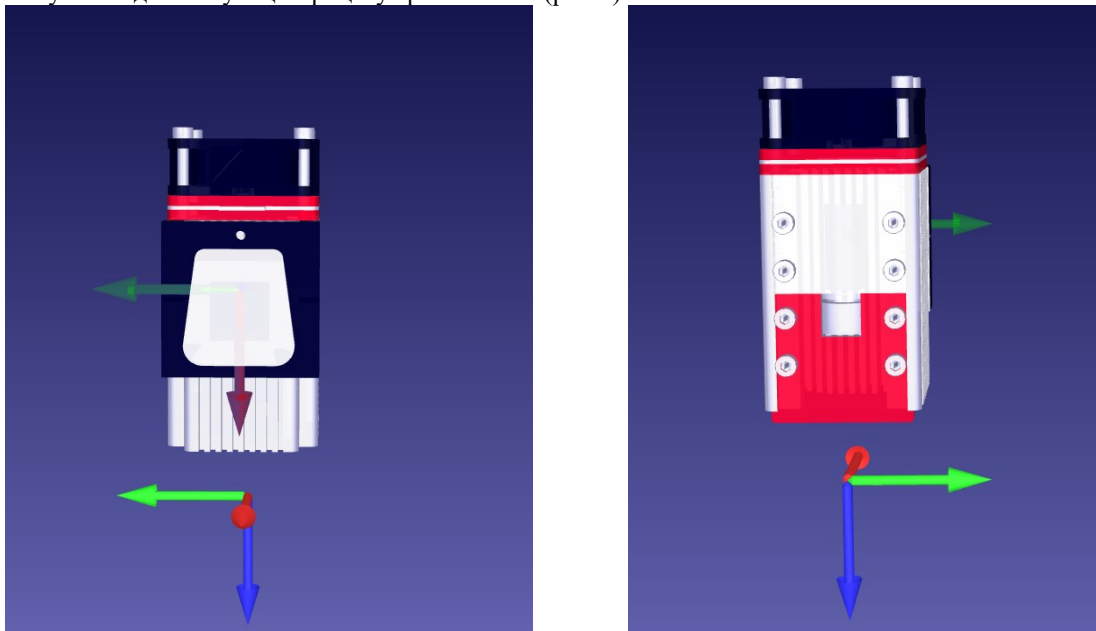


Рис.1. Робоча сцена в RoboDK

Наступним етапом є калібрування інструменту, що включає точне налаштування таких параметрів, як вага, розміри, потужність випромінювання та фокусна відстань лазерного променя. Також було задано відповідну систему координат, яка забезпечує правильне позиціонування інструменту в просторі відносно об'єкта гравіювання. Це дозволяє мінімізувати похибки при виконанні технологічного процесу.

На рис.2 наведено зображення робочої станції, яка була змодельована у програмному середовищі RoboDK для візуалізації процесу лазерного гравіювання.

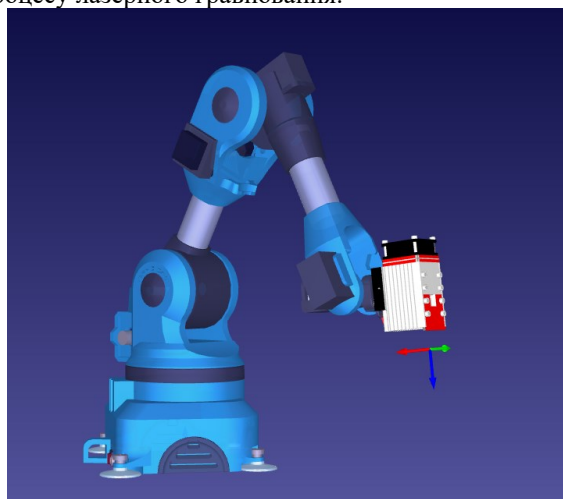


Рис.2. Зображення робочої станції

Робоча станція включає роботизовану руку, на яку встановлено лазерну головку, а також допоміжні елементи, необхідні для точного виконання технологічних операцій. Просторова організація компонентів дозволяє оптимізувати траєкторію руху маніпулятора, забезпечуючи безперервність процесу та виключаючи можливість зіткнень.

Після створення повноцінної робочої станції здійснюється моделювання процесу лазерного гравіювання у тривимірному середовищі. Для перевірки точності функціонування розглянуто задачу гравіювання на поверхні півсфери. На початковому етапі було імпортовано CAD-модель півсфери, визначено її орієнтацію у просторі та створено траєкторію руху лазерного інструменту. Для цього було використано інструменти побудови кривих у RoboDK, що дозволило задати оптимальну траєкторію переміщення лазера вздовж поверхні об'єкта.

Використовуючи RoboDK, було проведено ретельний аналіз можливих зіткнень між маніпулятором, деталлю та навколишніми об'єктами. Виявлення потенційних точок контакту ще на етапі симуляції дозволило внести необхідні корективи у траєкторію руху та оптимізувати просторове розташування компонентів системи.

Завдяки використанню RoboDK вдалося змодельовати кінцеву траєкторію руху лазерного інструменту (рис.3). Аналіз траєкторії дозволив оцінити ефективність гравіювання, визначити оптимальні режими роботи лазера та уникнути нерівномірного нанесення гравіювання. Було протестовано різні швидкості руху маніпулятора, що дозволило виявити найкращі параметри для стабільного виконання операцій.

Симуляція показала, що робот здатен охопити всі необхідні положення у робочому просторі, а також що конфліктні ситуації у русі маніпулятора та інструменту були успішно усунуті. Це підтверджує коректність проведених налаштувань та дозволяє здійснювати перехід до фізичної реалізації процесу.

Таким чином, створення робочої сцени в RoboDK та проведення симуляції дозволяє з високою точністю спрогнозувати технологічний процес, оптимізувати параметри роботи обладнання та мінімізувати ризики, пов'язані з впровадженням нових виробничих рішень. Завдяки цьому виробничі компанії можуть значно скоротити час підготовки обладнання, зменшити витрати та підвищити ефективність обробки матеріалів, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність підприємства.

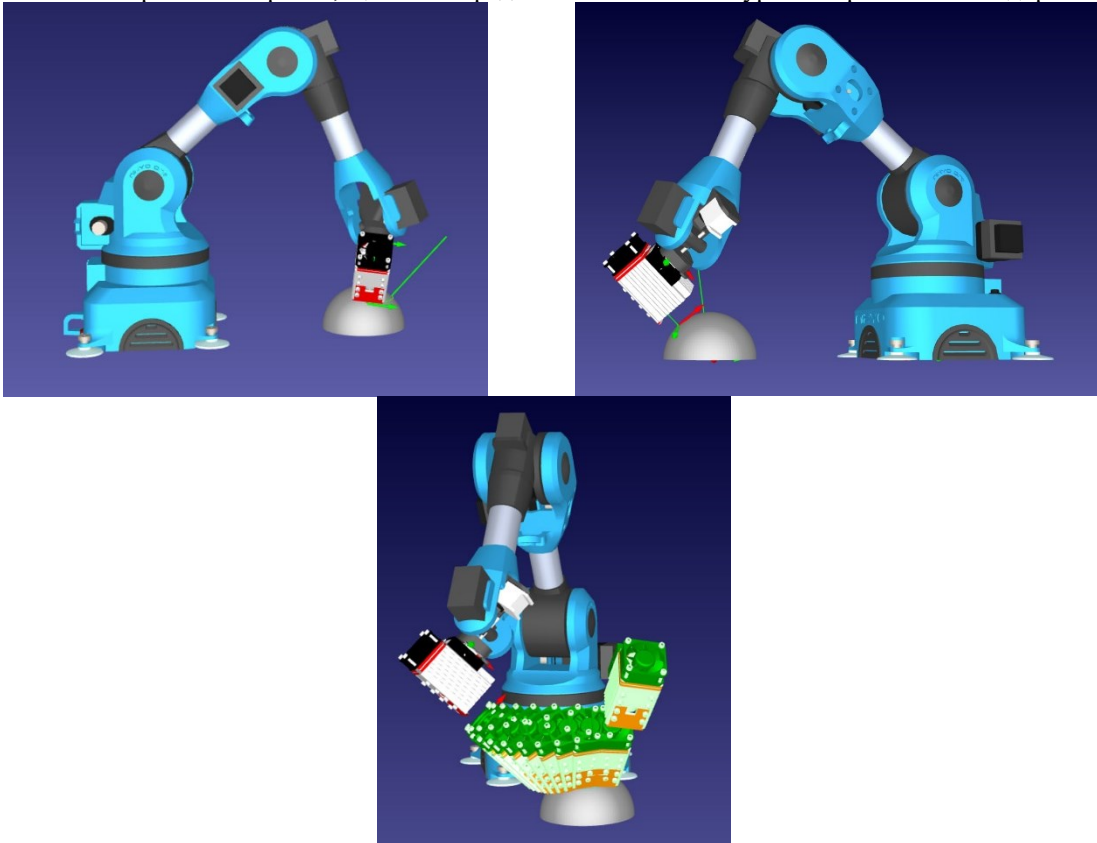


Рис.3. Траєкторія руху лазерного інструменту на поверхні півсфери

У подальшому лазерна головка була встановлена на роботизовану руку, що дозволило забезпечити її точне позиціонування та стабільність під час виконання операцій гравіювання (рис.4). Кріплення інструменту здійснювалося із врахуванням кінематичних характеристик маніпулятора, що дозволило мінімізувати вібрації та забезпечити високоточне наведення лазерного променя на оброблювану поверхню.



Рис.4. Роботизована рука з лазерною головкою

Для перевірки симуляції роботи робота-маніпулятора з лазерною головкою під час виконання операції лазерного гравіювання була використана роботизована рука із закріпленою лазерною головкою (рис.5).

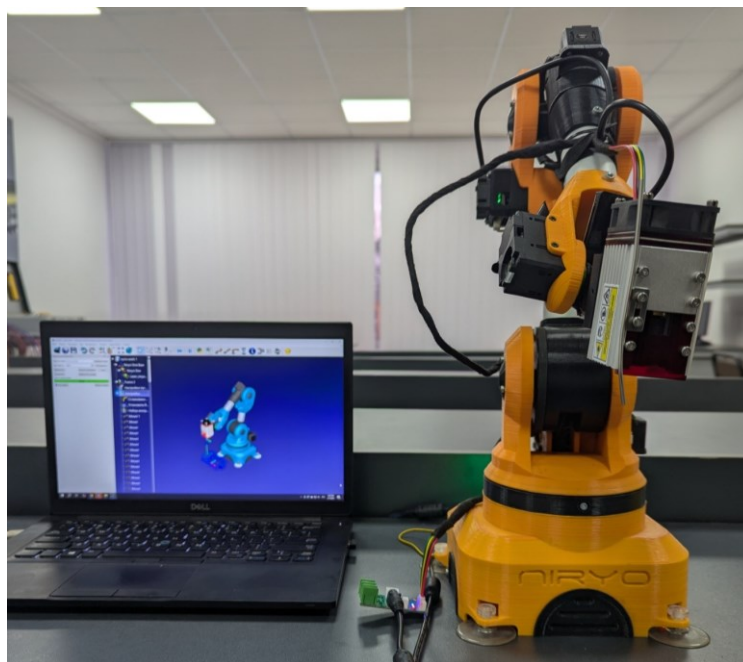


Рис.5. Перевірка симуляції роботи робота-маніпулятора із закріпленою лазерною головкою під час виконання операції лазерного гравіювання

Це дозволило на практиці оцінити точність виконання рухів маніпулятора, коректність налаштувань системи координат та відповідність отриманих результатів розрахунковим параметрам. У процесі тестування було перевірено стабільність роботи лазерного інструменту, точність траєкторії його руху та взаємодію з оброблюваною поверхнею. Використання роботизованої руки дозволило імітувати реальні умови експлуатації, що дало змогу виявити можливі неточності, скоригувати траєкторію гравіювання та оптимізувати параметри системи для підвищення ефективності процесу.

Висновки

Результати дослідження підтвердили ефективність використання RoboDK для моделювання та симуляції процесу лазерного гравіювання. Було розроблено та протестовано алгоритм створення віртуального середовища, що включає імпорт CAD-моделей, налаштування системи координат, калібрування інструменту та побудову оптимальної траєкторії гравіювання. Проведене тестування маніпулятора з лазерною голівкою дозволило оцінити стабільність роботи системи, точність траєкторії руху та відповідність розрахункових параметрів реальним умовам експлуатації.

Впровадження симуляційного моделювання дозволяє значно зменшити витрати на експериментальне налаштування обладнання, оптимізувати маршрути руху маніпулятора та запобігти можливим зіткненням. Це особливо актуально для галузевого машинобудування та легкої промисловості, де точність та стабільність виконання операцій відіграють ключову роль. Лазерне гравіювання, як технологічний процес, потребує високої точності позиціонування, і застосування RoboDK допомагає досягти цього завдяки можливості попереднього тестування та внесення коректив ще до запуску виробництва.

Таким чином, застосування цифрового моделювання дозволяє значно покращити ефективність виробничих процесів, скоротити час на налаштування роботизованих систем та підвищити якість кінцевої продукції. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення інших роботизованих технологій, що потребують високої точності та автоматизованого керування. Використання RoboDK у комплексі з сучасними методами програмного моделювання відкриває нові можливості для автоматизації виробничих процесів та підвищення їхньої продуктивності.

Література

1. Craig, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. – Pearson, 2017.
2. Nof, S.Y. *Handbook of Industrial Robotics*. – Wiley, 2019.
3. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies*. – Springer, 2015.
4. RoboDK Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://robodk.com/doc/en/> (date of application: 30.01.2025).
5. Zhang, W., Fang, F. *Precision Laser Processing: Fundamentals and Applications*. – Elsevier, 2019.
6. Groover, M.P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. – Prentice Hall, 2018.
7. Niryo One, an accessible robot for makers powered by open source [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://niryo.com/niryo-one-accessible-robot-open-source/> (дата звернення: 28.01.2025).
8. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. – Херсон: Олді-плюс, 2018. – 252 с.

References

1. Craig, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. – Pearson, 2017.
2. Nof, S.Y. *Handbook of Industrial Robotics*. – Wiley, 2019.
3. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies*. – Springer, 2015.
4. RoboDK Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://robodk.com/doc/en/> (date of application: 30.01.2025).
5. Zhang, W., Fang, F. *Precision Laser Processing: Fundamentals and Applications*. – Elsevier, 2019.
6. Groover, M.P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. – Prentice Hall, 2018.
7. Niryo One, an accessible robot for makers powered by open source [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://niryo.com/niryo-one-accessible-robot-open-source/> (data zvernennia: 28.01.2025).
8. Koziar M.M., Feshchuk Yu.V., Parfeniuk O.V. *Kompiuterna hrafika: SolidWorks: navchalnyi posibnyk*. – Kherson: Oldi-plus, 2018. – 252 s.