

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНОЮ ВИРОБНИЧОЮ ДІЛЯНКОЮ

**Панков А.А.**

Харківський національний університет радіоелектроніки  
Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14

**E-mail:** [artem.pankov@nure.ua](mailto:artem.pankov@nure.ua)

**Анотація:** В роботі проведено аналіз предметної області виробничої промисловості та моделювання технічних систем, проведено порівняння програмних продуктів-аналогів як засобів реалізації, деталізовано мету та задачі проекту. Описано етап моделювання та проектування імітаційної моделі, побудовано структурно-функціональні моделі процесів побудови та використання моделі у нотації IDEF0, концептуальна модель системи OFD.

**Ключові слова:** автоматизація, виробничі процеси, імітаційна модель, виробнича система, гнучкі виробничі лінії.

## RESEARCH OF METHODS FOR DEVELOPING A SOFTWARE MODULE FOR AUTOMATED CONTROL OF A CLOSED PRODUCTION AREA

**Artem Pankov**

Kharkiv National University of Radioelectronics  
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av.,14

**E-mail:** [artem.pankov@nure.ua](mailto:artem.pankov@nure.ua)

**Abstract:** The work analyzes the subject area of the manufacturing industry and modeling of technical systems, compares similar software products as means of implementation, details the goal and objectives of the project. Describes the stage of modeling and designing a simulation model, constructs structural and functional models of the processes of building and using the model in IDEF0 notation, and a conceptual model of the OFD system.

**Keywords:** automation, production processes, simulation model, production system, flexible production lines.

**ВСТУП.** Однією з основних тенденцій Індустрії 4.0 є цифровий двійник. Цифровий двійник – цифрова модель об'єкту або процесу, побудована на основі отриманої інформації з датчиків, встановлених на фізичному об'єкті, що дозволяє за допомогою симуляції у реальному часі оптимізувати ефективність системи. Концептуальна модель цифрового двійника включає три компоненти, одним з яких є модель системи у віртуальному просторі [1], яка може бути реалізована у вигляді імітаційної моделі.

Моделювання виробництва є недорогим і безпечним способом тестування і прогнозування поведінки системи будь-якої складності при невеликих змінах чи повній модернізації для досягнення цілей виробництва з мінімальними витратами [2].

На сьогодні галузь виробництва в Україні недостатньо розвинена і не може конкурувати з продуктами аналогами інших країн [2]. Відсутність новітніх технологій, технічного переоснащення, висококваліфікованого персоналу стало причиною низького рівня розвитку виробничої промисловості в Україні. Тому наразі є гостра потреба удосконалювати виробничі системи, що завжди супроводжується невизначеністю та значними ризиками. Високорозвинені країни для вирішення такої складної проблеми використовують імітаційне моделювання, що найбільше підходить для створення складних систем з багаторівневою організацією, великою

кількістю елементів, взаємозв'язків між ними, відтворення процесу у часі з урахуванням випадкових подій та дискретних величин.

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ.** Фізичний експеримент – один з перших методів моделювання, але активно використовується по цей день. Фізична модель – це відтворення досліджуваної системи зі збереженням її фізичних властивостей.

Важливим етапом створення авіаційної техніки, комплексів, систем є проведення випробувань моделі.

Переваги:

- мають велику точність відносно реального об'єкту та надають найбільш повну, точну інформацію про систему.

Недоліки фізичного моделювання:

- проведення експериментів з реальним об'єктом є ризикованим;
- створення прототипу може бути затратним;
- великі витрати часу на моделювання та проведення експериментів над великими та складними об'єктами.

Аналітичне моделювання полягає у математичному описі об'єкта. Модель подається у вигляді функціональних залежностей початкових та кінцевих параметрів. Рішення найчастіше представлене у вигляді перетворення Лапласа або системи диференційних рівнянь. Як правило аналітична модель є статичною.

Переваги:

- простота моделі;
- метод є найкращим для знаходження оптимального рішення.

Недоліки аналітичного моделювання:

- дозволяють аналізувати малу кількість факторів;
- значні спрощення, що можуть призвести до неточності результатів;
- системи високої складності важко аналізувати;
- неможливо описати паралельні процеси;
- складно визначити вплив мінливості параметрів моделі.

Імітаційне моделювання дозволяє відтворювати процеси у часі, що дозволяє по вхідним даним визначити стан системи у майбутньому. Нині цей метод є найбільш ефективним, іноді єдиним для дослідження систем на етапі їх проектування [3].

Метод імітаційного моделювання надає можливість описати різні елементи системи та взаємодію між ними. Система може перебувати у різних станах, які залежать від певних параметрів, зміна яких імітує перехід з одного стану в інший [4]. Таким чином, імітаційна модель – динамічне зображення змін станів системи з плином часу.

В основному для моделювання використовуються підхід випадкових величин та багаторазове відтворення процесу. У результаті отримуються статистичні дані, що характеризують функціонування системи [5].

Переваги:

- витрати на побудову імітаційної моделі обмежені вартістю програмного забезпечення та деяких послуг;

- у порівнянні з фізичною моделлю, імітаційна здатна надати результати за коротший час;

- варіативність значень параметрів системи дає можливість проводити велику кількість експериментів;

- імітаційне моделювання дозволяє зобразити систему, уникаючи математичних формул і залежностей;

- графічне зображення структури та процесів роботи системи більш наочне і просте для розуміння;

– універсальний метод моделювання будь-яких сфер життя: виробництво, охорона здоров'я, фінансування та ін.

Недоліки:

- імітаційна модель не завжди допомагає вирішити поставлені питання;
- моделювання великих і складних систем може зайняти багато часу;
- модель не є абсолютно точною копією реальної системи;
- імітаційне моделювання не дає такої точності, як математичне.

**АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.** Існує чотири основних підходи імітаційного моделювання: динамічне моделювання, системна динаміка, дискретно-подійне й агентне моделювання, метод статистичних випробувань Монте-Карло.

Динамічні системи (механічні або фізичні процеси) описуються алгебраїчними, диференційними рівняннями і блок-схемами.

Системно-динамічний підхід для дослідження динамічних процесів спрямований на вивчення складних систем зі зворотнім зв'язком. Процеси представляються у вигляді діаграми, що складається з петель позитивного та негативного зворотного зв'язку. Найбільша увага приділяється моделювання зворотних зв'язків.

У дискретно-подійному підході модельний час рухається від події до події, або через дискретні проміжки часу. Цей підхід застосовується у тому випадку, якщо змінні системи змінюються миттєво у визначені проміжки часу. При дискретно-подійному моделюванні розглядаються тільки основні події модельованої системи, наприклад очікування, обробка, рух з вантажем, розвантаження та інші. Дискретно-подійне моделювання застосовується у логістиці, системах масового обслуговування, транспортних і виробничих системах [6-7].

В агентному моделюванні досліджується поведінка агента та його вплив на функціонування системи [6]. Ключовими елементами агентного моделювання є карти станів. Цей підхід застосовується для імітації інтелектуальних, розподілених та децентралізованих систем, щоб отримати відомості про вплив функціонування і взаємодії елементів на систему.

Метод Монте-Карло – числовий метод розв'язання математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин. Метод статистичних випробувань дозволяє моделювати будь-який процес, на протікання якого впливають випадкові фактори. Даний метод полягає у використанні генератора рівномірно розподілених випадкових чисел у зв'язку з функцією розподілення ймовірностей досліджуваного процесу [8]. Після визначення функцій на основі теоретичного, емпіричного або іншого розподілу, що відповідає характеру досліджуваного процесу, створюються випадкові вибірки – значення вхідних даних. За допомогою прогонів імітаційної моделі багато разів отримуємо відповідну множину значень вхідних і вихідних параметрів. За допомогою статистичного аналізу вихідних даних приймається рішення [9].

Для побудови імітаційної моделі виробничої ділянки був обраний дискретно-подійний метод.

Після вибору підходу розробляється імітаційна модель. Процес побудови складається з таких етапів [7]:

- а) точне формулювання мети дослідження;
- б) збір інформації і даних;
- в) розробка концептуальної моделі;
- г) перевірка концептуальної моделі на адекватність поставленій задачі;
- д) побудова моделі у програмному середовищі по концептуальній моделі;
- е) верифікація запрограмованої моделі;
- ж) розробка, проведення та аналіз експериментів;
- з) документування та представлення отриманих результатів.

Для того, щоб досягти найбільшої точності моделі, при її розробці необхідно взаємодіяти з предметними експертами та замовниками проекту. Для більш простої верифікації та валідації використовується анімація моделі.

**ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ.** Першим етапом реалізації проекту є проектування процесів розробки імітаційної моделі (ІМ) у вигляді контекстної діаграми.

Контекстна діаграма процесу розробки імітаційної моделі описана за допомогою методології IDEF0 (рис. 1).

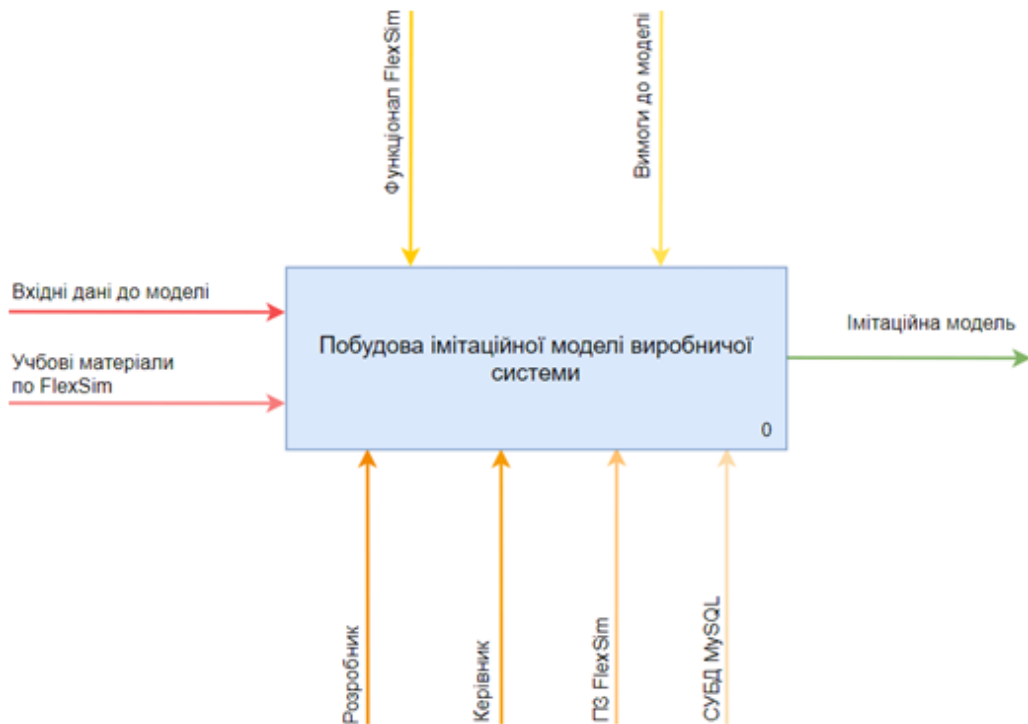


Рисунок 1 – Контекстна діаграма процесу розробки ІМ

Елементи діаграми процесу розробки ІМ:

- процес: побудова імітаційної моделі ВС;
- вхід: вхідні дані до моделі, визначені у технічному завданні (ТЗ), учбові матеріали по використанню ПЗ FlexSim;
- управління: інтерфейс та функціонал ПЗ FlexSim, у якому реалізується ІМ, вимоги до моделі, зазначені у ТЗ;
- механізми: розробник даного проекту, керівник проекту, ПЗ FlexSim, СУБД MySQL для розробки та управління базою даних (БД);
- вихід: імітаційна модель, готова для використання, тобто аналізу ВС та перевірки гіпотез.

Деталізуємо основний процес концептуальної моделі розробки ІМ. Діаграма декомпозиції першого рівня у нотації IDEF представлена на рис. 2. Процес програмної реалізації ІМ деталізований у моделі декомпозиції другого рівня (рис. 3).

ІМ у нотації IDEF, виділені у діаграмі декомпозиції розробки ІМ:

- побудова концептуальної моделі системи – OFD діаграма;
- структуризація даних – розробка БД для зберігання вхідних даних до моделі;
- побудова 3D моделей у програмі 3Ds Max;
- програмна реалізація – побудова імітаційної моделі відповідно вимогам.

Програмна реалізація імітаційної моделі поділена такі етапи:

- підключення до БД засобами FlexSim;
- побудова імітаційної моделі у середовищі FlexSim – додавання відповідних елементів та налаштування логіки моделі;
- тестування імітаційної моделі – визначення відповідності моделі вимогам та виправлення помилок;
- збір статистичних даних – побудова панелі збору статистики засобами FlexSim;
- побудова графічного інтерфейсу для зміни вхідних даних та параметрів моделі.

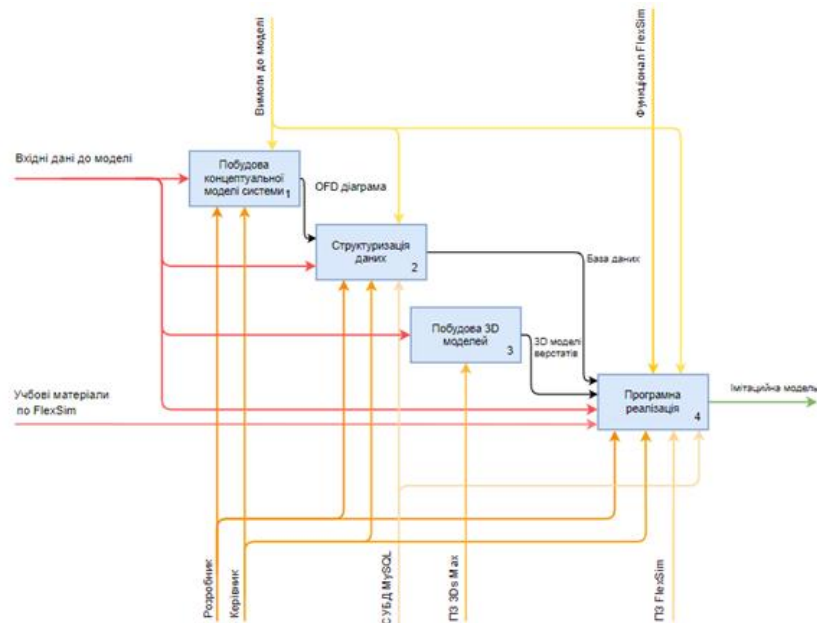


Рисунок 2 – Модель декомпозиції першого рівня розробки

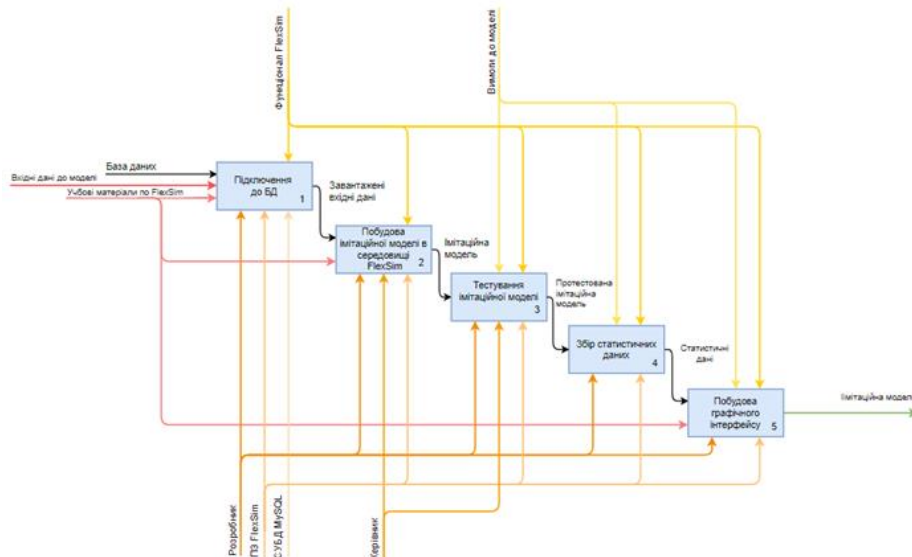


Рисунок 3 – Модель декомпозиції другого рівня процесу програмної реалізації ІМ

За допомогою IDEF0 опишемо функціональний аспект імітаційної моделі. Структурно-функціональна модель процесу, який реалізується у розроблюваній моделі зображена у вигляді

концептуальної моделі на рис. 4. Для досягнення вищого рівня деталізації основна функція ділиться на під функції, які описані у моделі декомпозиції першого рівня (рис. 5).

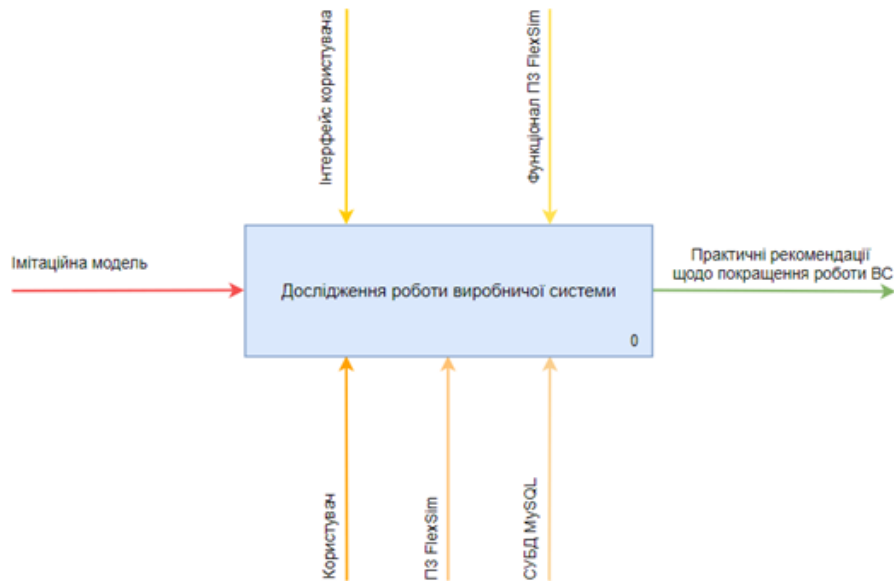


Рисунок 4 – Контекстна діаграма процесів, що реалізуються в ІМ

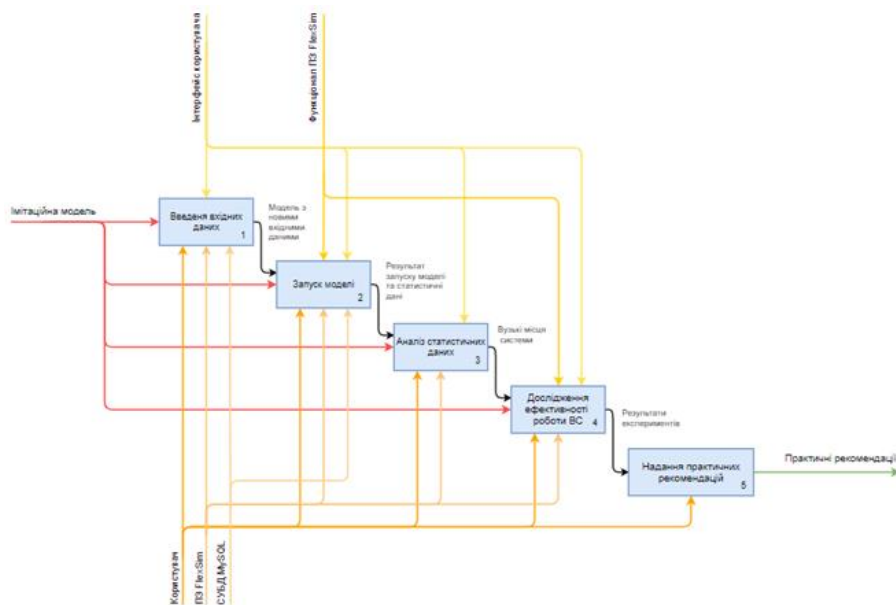


Рисунок 5 – Модель декомпозиції першого рівня процесів, що реалізуються в ІМ

Елементи контекстної діаграми функціоналу імітаційної моделі:

- процес: дослідження роботи виробничої системи, визначення її ефективності при заданих початкових даних;
- вхід: імітаційна модель, готова до використання;
- управління: функціонал ПЗ FlexSim, інтерфейс користувача, який дає змогу змінювати вхідні дані та задавати параметри;

- механізми: користувач, ПЗ FlexSim, СУБД MySQL;
- вихід: практичні рекомендації щодо покращення роботи ВС, надані на основі результатів перевірки гіпотез.

Етапи дослідження ВС за допомогою імітаційної моделі:

- введення вхідних даних користувачем, для дослідження роботи системи з іншими параметрами;
- запуск моделі – проведення процесу імітації;
- аналіз статистичних даних – проведення аналізу даних, що відображається на панелі збору статистики після запуску моделі;
- дослідження ефективності роботи ВС – висновок про ефективність системи на основі проаналізованих статистичних даних;
- надання практичних рекомендацій щодо покращення роботи ВС за результатами дослідження.

**ВИСНОВКИ.** В роботі визначено основні вимоги до проекту та імітаційної моделі, описана структура виробничої системи, склад і зміст робіт із розробки імітаційної моделі.

У плануванні робіт деталізовано мету методом SMART, побудовано діаграми WBS для відображення ієрархічної структури робіт та OBS, яка показує організаційну структуру проекту, складено календарний план у вигляді діаграми Ганта, проведено аналіз ризиків проекту.

Проаналізовано методи і засоби реалізації, складено порівняльну характеристику продуктів-аналогів, що могли бути використані для вирішення поставлених задач. Був обраний метод імітаційного моделювання і дискретно-подійний підхід та середовище моделювання FlexSim.

Було побудовано контекстну діаграму та діаграми декомпозиції процесу розробки, структурно-функціональну модель у нотації IDEF та концептуальну модель імітаційної моделі OFD.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Невлюдов І.Ш., Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник Харків: ФОП Панов А.М., 2021., 604 с.
2. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 2: Підручник Кривий Ріг: видавець Чернявський Д.О., 2022 – 424 с.з іл.
3. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник. Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. 444 с.
4. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник/ І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2018. 190 с.
5. Krynke, M. (2021). Personnel management on the production line using the Flexsim simulation environment. *Manuf Technol*, 5, 657-67.
6. Ljaskovska, S., Martyn, Y., Malets, I., & Velyka, O. (2020, August). Optimization of Parameters of Technological Processes Means of the FlexSim Simulation Program. In *2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)* (pp. 391-397). IEEE.
7. Patil, R. J., Kubade, P. R., & Kulkarni, H. B. (2019, December). Optimization of machine shop layout by using flexsim software. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2200, No. 1, p. 020033). AIP Publishing LLC.
8. Wu, G., Yao, L., & Yu, S. (2018, June). Simulation and optimization of production line based on FlexSim. In *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (pp. 3358-3363). IEEE.

9. He, H., & Hu, Z. (2018, July). Analysis of fast food service capability based on flexsim modeling and simulation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 394, No. 5, p. 052005). IOP Publishing.
10. Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). Using Convolutional Neural Networks to Analyze and Detect Key Points of Objects in Image. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 5-15.
11. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). Improvement of SUSAN Image Filtering Method for PCB Quality Inspection. *Journal of universal science research*, 2(7), 106-116.
12. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., & Maksymova, S. (2024). Humanoid Robot Movement Simulation in ROS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(7), 146-154.
13. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2024). *Comparison of Functional Capabilities of Classic Manipulator Robots and Collaborative Robots* (Doctoral dissertation).
14. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2024). *New Concepts of Human Interactions and Collaborative Robot-Manipulators in the Concepts of Industry 5.0* (Doctoral dissertation, Collection of scientific papers «SCIENTIA»).
15. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2024). *Study of Methods of Dynamic Description of The Environment for Collaborative Robots-Manipulators in the Concepts of Industry 5.0* (Doctoral dissertation, Collection of scientific papers «SCIENTIA»).
16. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2024). *A Model of Using Computer Vision to Monitor the Environment of a Collaborative Manipulator Robot* (Doctoral dissertation).
17. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Starodubcev, N., & Klymenko, O. (2023, September). Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT. In *2023 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 1-5). IEEE.
18. Nevliudov, I. S., Yevsieiev, V. V., Demska, N. P., & Kostrova, H. Y. (2023). Development and Improvement of the Design of a Lightweight Mobile Robot Manipulator Using Generative Design.
19. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2023). *Application of Generative Design Methods for Improving Manipulator Designs for Mobile Robots* (Doctoral dissertation, Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького).
20. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In *2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 61-64). IEEE.
21. Євсєєв, В. В., Демська, Н. П., & Олександров, Ю. М. (2022). *Моделювання виробничої лінії SMT-монтажу в кібер-фізичних виробничих системах* (Doctoral dissertation, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського).
22. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2023). *Application of Generative Design Methods for Improving Manipulator Designs for Mobile Robots* (Doctoral dissertation, Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького).
23. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2021, September). Study of the Structure of Cyber-Physical Production Systems in Industry 4.0. In *The I International scientific-practical conference "Problems of modern science and practice"* (pp. 431-434).

**Науковий керівник:** Артюх Роман Володимирович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки