

Харківський національний університет радіоелектроніки

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КЛИМЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 681.51:621.867]:615.012

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
РОБОТИЗОВАНОЮ КОНВЕЄРНОЮ ЛІНІЄЮ СОРТУВАННЯ
ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ**

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.М. Клименко

Науковий керівник:

Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Лауреат Державної премії України в галузі освіти

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Клименко О.М. Моделі і методи автоматичного керування роботизованою конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.
– Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2025.

Актуальність дослідження полягає у важливості вдосконалення конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції через постійний розвиток галузі та необхідність удосконалення виробничих процесів. Застосування автономних транспортних систем у цій сфері дозволяє підвищити продуктивність та знизити собівартість продукції, що є ключовими в умовах зростаючої конкуренції. В контексті цифровізації та Індустрії 4.0 розвиток автономних систем керування є стратегічно важливим для забезпечення конкурентоспроможності фармацевтичних підприємств. Оскільки сортування фармацевтичної продукції вимагає високої якості та точності ідентифікації, безпеки транспортування та точності виконання виробничих процесів, удосконалення транспортних систем є нагальним завданням. Такі дослідження є актуальними з огляду на потребу в постійному вдосконаленні технологій та методів керування для відповідності сучасним вимогам. Враховуючи швидкий розвиток технологій, постійне удосконалення транспортних систем є важливим для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності фармацевтичних виробників.

Дисертаційна робота є продовженням досліджень, які проводяться на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) під керівництвом завідувача кафедри КІТАР, доктора технічних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки

України, лауреата Державної премії в галузі науки і техніки України, Невлюдова Ігоря Шакировича.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи роботизованої системи сортування за рахунок розробки моделей та методів автоматичного керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування роботизованою конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.

Предметом дослідження є моделі, методи, алгоритмічне та програмне забезпечення системи автоматичного керування процесом сортування фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії.

Методи дослідження. В роботі застосовуються наступні методи. Метод опису параметричних моделей використовується для формалізації процесу упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Цей метод дозволяє точно визначити параметри упаковки (наприклад, розміри упаковки, кількість товарів у пачці, швидкість руху конвеєра тощо) і побудувати параметричну модель, яка описує цей процес. Використання параметричних моделей дозволяє проводити аналіз ефективності упаковки, здійснювати оптимізацію процесу та прогнозувати результати в залежності від зміни параметрів. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність та якість упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Метод опису системних рівнянь, що дозволяє спростити подання та опис параметрів та характеристик вторинної та третинної типів упаковки для фармацевтичної продукції. Методи розподілу упаковок за обраними робочими зонами («load balancing» – LB) та розподілу упаковок по всіх робочих зонах дозволяють провести оптимізацію процесу сортування, перерозподілу зусиль робітників для більш ефективного використання часу моделювання та збільшення загальної кількості відсортованих упаковок. Метод нормалізації зображення дає можливість описати динамічні властивості сигналу та їхню класифікацію, він використовує авторегресійну складову та ковзне середнє (MA – moving

average) похибки як допоміжну, щоб характеризувати модель авторегресії (Autoregression – AR) при обробці QR-коду. Метод "найближчого сусіда" забезпечує згладжування та збереження деталей зображення, що особливо корисно для QR-коду, де важлива чітка та читабельна структура, особливо у випадку конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції. Використовується метод коду Ріда-Соломона для кодування інформації в QR-коді.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Вперше розроблено параметричну модель формалізації упаковки фармацевтичної продукції, яка на відміну від існуючих дає можливість розпізнати тип упаковки за допомогою базових ознак, що дозволяє створити умови для проєктування систем автоматизації, що забезпечує можливість скоротити час ідентифікації та сортування фармацевтичної продукції.

2. Вперше розроблено метод адаптивності навантаження на конвеєрну лінію сортування фармацевтичної продукції, який дозволяє розподілити упаковки по робочих зонах роботів-сортувальників таким чином, щоб навантаження було однаковим для кожного робота, це дає можливість удосконалити процес сортування та перерозподілу зусиль роботів для більш ефективного використання часу.

3. Удосконалено метод нормалізації кадру зображення QR-коду за рахунок заміни шумового пікселя середнім значеннями, порахувавши з урахуваннями значень всіх пікселів, що дає можливість покращити розпізнавання інформації на QR-коді при різних зовнішніх параметрах процесу сортування фармацевтичної продукції.

4. Удосконалено метод кодування інформації за рахунок використання поліном-генератора у вигляді коду Ріда-Соломона, що дає можливість покращити зчитування інформації з QR-коду у разі його часткового пошкодження або стертості в процесі сортування фармацевтичної продукції.

5. Отримав подальший розвиток метод розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної

продукції на базі алгоритма Форні, що дозволяє виконувати обчислення, спрямовані на визначення коефіцієнтів помилок у переданому QR- коді.

6. Отримала подальший розвиток математична модель керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції з використанням PID регуляторів, що дає можливість стабільного зчитування інформації з QR-коду та узгодити функціонування роботів-сортувальників в часі.

Практичне значення результатів роботи. Отримані в роботі метод розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичних товарів на базі алгоритму Форні та макет системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній лінії на базі QR-кодів впроваджено у виробничий процес компанії ТОВ «Аметрін ФК» (акт від 06.12.2024). Також метод кодування інформації за рахунок використання поліном-генератора у вигляді кода Ріда-Соломона та макет системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній лінії на базі QR-кодів впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського» при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Методи оптимізації процесів керування», «автоматизація технологічних процесів і виробництв» для спеціальності 174 – Автоматизація, та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт від 20.09.2024). Метод нормалізації кадру зображення QR-коду, а також макет системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок були впроваджені в освітній процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лекційних та лабораторних занять з дисципліни «Цифрова обробка сигналів та зображень» для спеціальностей 172 Електронні комунікації та радіотехніка та

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт від 15.10.2024). Удосконалені методи кодування інформації та її розкодування з урахуванням можливості пошкоджень QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі КІТАР при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Програмно-технічні комплекси та програмне забезпечення АСУ ТП», «Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації» та «Автоматизовані системи управління роботизованим виробництвом» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (акт від 06.09.2024). Моделі та методи керованого технологічного процесу функціонування транспортного засоба-шатла в автоматизованих внутрішньо складських системах було впроваджено у виробничі процеси компанії KAPELOU (Україна) (акт від 18.06.2024). Метод кодування інформації та макет системи комп'ютерного зору для промислової конвеєрної лінії було впроваджено виробничі процеси компанії KAPELOU (Німеччина) (акт від 27.08.2024). На базі проведених досліджень отримані 2 патенти: патент України (№126885 від 15.02.2023) та міжнародний патент (Німеччина, №2023042415393600DE від 24.04.2023).

Результати дисертаційної роботи досить повно викладені у 20 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 8 статей в фахових виданнях, 4 в закордонних виданнях, 4 наукових фахових видань України (категорії «Б»), 8 тез доповідей, 2 розділи монографії, 1 міжнародний патент, 1 патент України. Праці індексуються в базах Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Ключові слова: Industry 4.0, автоматична система керування, реконфігурована виробнича система, роботизовані системи, робот-маніпулятор, мобільний робот, автономний мобільний робот, автоматична сортувальна конвеєрна лінія, автоматична сортувальна лінія, автоматична

лінія, ідентифікація, розпізнавання об'єктів, система розпізнавання об'єктів, розпізнавання користувача, формалізація об'єктів фармацевтичної продукції, фармацевтична продукція, обробка зображень, фільтр Калмана, нормалізація кадру, обробка QR-коду, план експерименту, прийняття рішень.

Список публікацій здобувача

1. Deutsches Patent- und Markenamt «Robotermodul sowie Industrieroboter mit Robotermodul» Aktenzeichen: 20 2023 102 166.2 (№2023042415393600DE від 24.04.2023)

2. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M.. Features Of Wave Algorithm Application In Warehouse Logistics Transport Systems. Information systems in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde – European University Press. Riga: ISMA, 2023. P. 251-261.

3. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O., Demska N., Vzhesnievskyi M. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms In Warehousing 4.0. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2021. № 4 (18). С. 57- 64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>.

4. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M. Shuttle-Based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development. Journal of Natural Science and Technologies. Vol. 2 No. 2 (2023). P.232-237.

5. Yevsieiev V., Nevliudov I., Maksymova S., Omarov M., Klymenko O. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support. Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal, 17, No. 6, PP: 1073-1088. <https://doi.org/10.18576/amis/170615>.

6. Клименко О. М. Концепція роботи алгоритмів машинного навчання на базі методу найближчих сусідів для балансування навантаження на

конвеєрних лініях сортування продукції // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 1 (75). – С. 28-30. – <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.028>.

7. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. (2024), "The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line", Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, No. 1 (24), P. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.000>.

8. Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Вжесневський М. О., Клименко О. М. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі. //VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. 140 с. С. 87-88.

9. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O. Development of the QR-Code Frame Processing Method for Sorting Conveyor Lines // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2023. - 165 с. С.158-160.

10. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N., Demska N., Klymenko O. Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine.

11. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Mospan, D., Klymenko, O. Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine.

12. Nevliudov I., Chala O., Botsman I., Klymenko O., Vzhesnievskiy M. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in

the Electronic Devices Manufacture // Proceedings of the XII International Scientific Conference «Functional Basis of Nanoelectronics». – Odesa, September 20-24, 2021. – PP. 74-77.

13. Klymenko, O. (2024). Research On The Application Of The Round Robin Algorithm For Load Balancing On Conveyor Lines In The Pharmaceutical Industry. *Grail of Science*, (35), 170–172. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.01.2024.028>.

14. Klymenko O. Research on the Application of Dynamic Programming Algorithm for Load Balancing on Conveyor Lines in the Pharmaceutical Industry / O. Klymenko // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale*, Paris, 1er Mars 2024. Paris-Vinnytsia. P.184-186. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.041>.

15. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., & Klymenko O. Development of a Hardware Module for Programming Microcontrollers Based on the Cortex-M Architecture. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 171–181.

16. Nevliudov I., Maksymova S., Yevsieiev V., & Klymenko O. Using Mecanum Wheels for Radio Shuttle. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 182–187.

17. Nevludov I., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference*, Kharkiv, October 20-21, 2022: Thesises of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2022. – 136 p. P. 24-26.

18. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O. Conveyor line development features for pharmaceutical products industrial logistics. Decision support systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2024. 256 p. P.152-174. <https://doi.org/10.30837/MMP.2024.152>.

19. Nevliudov, I., Maksymova, S., Klymenko, O., & Bilousov, M. (2023). Development of a mobile robot prototype with an interactive control system. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 3(73), 128-133.

20. Патент на винахід №126885 «Автоматизована складська логістична станція», зареєстровано в Державному реєстрі України винаходів 15.02.2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1723464/>

ABSTRACT

Klymenko O.M. Models and Methods of Automatic Control of a Robotic Conveyor Line for Sorting Pharmaceutical Products – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 Automation and computer-integrated technologies. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The relevance of the study lies in the importance of improving conveyor lines for sorting pharmaceutical products due to the constant development of the industry and the need to improve production processes. The use of autonomous transport systems in this area allows you to increase productivity and reduce the cost of products, which are key in the context of growing competition. In the context of digitalization and Industry 4.0, the development of autonomous control systems is strategically important for ensuring the competitiveness of pharmaceutical enterprises. Since the sorting of pharmaceutical products requires high quality and accuracy of identification, transportation safety and accuracy of production processes, improving transport systems is an urgent task. Such research is relevant in view of the need for constant improvement of technologies and control methods to meet modern requirements. Given the rapid development of technologies, constant improvement of transport systems is important for ensuring the efficiency and competitiveness of pharmaceutical manufacturers.

The dissertation is a continuation of research conducted at the Department of Computer Integrated Technologies, Automation and Robotics (CITAR) of the Kharkiv National University of Radio Electronics under the supervision of the Head of the CITAR Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Laureate of the State Prize in Science and Technology of Ukraine, Igor Shakirovich Nevlyudov.

The **purpose** of the dissertation is increasing the efficiency of the robotic sorting system by developing models and methods for automatic control of the conveyor line for sorting pharmaceutical products.

The **object** of the study is the process of automatic control of a robotic conveyor line for sorting pharmaceutical products.

The **subject** of the study is models, methods, algorithmic and software of an automated system for automatic control of the process of sorting pharmaceutical products on a conveyor line.

Research methods. The following methods are used in the work: description of parametric models is used to formalize the process of packaging pharmaceutical products on a conveyor line. This method allows to accurately determine the packaging parameters (for example, package dimensions, number of products in a pack, conveyor speed, etc.) and build a mathematical model that describes this process. The use of parametric models allows to analyze the efficiency of packaging, optimize the process and predict results depending on changes in parameters. This approach allows you to increase the productivity and quality of packaging pharmaceutical products on a conveyor line. A method for describing system levels that allows for simplified representation and description of parameters and characteristics of secondary and tertiary packaging types for pharmaceutical products. The methods of distributing packages by selected work zones («load balancing») and distributing packages across all work zones allow to optimize the sorting process, redistribution of robot efforts for more efficient use of simulation time and increase in the total number of sorted packages. The image normalization method makes it possible to describe the dynamic properties of the signal and their classification, it uses the autoregressive component and the moving average of the error as an auxiliary to characterize the autoregression model when processing the QR code. The "nearest neighbor" method provides smoothing and preservation of image details, which is especially useful for the QR code, where a clear and readable structure is important, especially in the case of a conveyor line for sorting

pharmaceutical products. The Reed-Solomon code method is used to encode information in the QR code.

The **scientific novelty** of the dissertation work is as follows:

1. For the first time, a parametric model of the formalization of pharmaceutical packaging has been developed, which, unlike existing ones, allows you to recognize the type of packaging using basic features, which allows you to create conditions for designing automation systems that provide the opportunity to reduce the time for identifying and sorting pharmaceutical products.

2. For the first time, a method of load adaptability on the conveyor line for sorting pharmaceutical products has been developed, which allows you to distribute packages across the working areas of sorting robots in such a way that the load is the same for each robot, which makes it possible to improve the sorting process and redistribute the efforts of robots for more efficient use of time.

3. The method of normalizing the QR code image frame by replacing the noise pixel with the average value, calculated taking into account the values of all pixels, which makes it possible to improve the recognition of information on the QR code with different external parameters of the pharmaceutical product sorting process.

4. The method of encoding information has been improved by using a polynomial generator in the form of a Reed-Solomon code, which makes it possible to improve the reading of information from a QR code in case of its partial damage or erasure during the sorting of pharmaceutical products.

5. The method of decoding information from damaged QR codes on the conveyor line of sorting pharmaceutical products has been further developed based on the Forni algorithm, which allows calculations to be performed to determine the error coefficients in the transmitted QR code.

6. A mathematical model for controlling the speed of the pharmaceutical product sorting conveyor line using PID regulators has been further developed, which allows for stable reading of information from the QR code and coordinating the functioning of sorting robots in time.

Practical significance of the results of the work. The method of decoding information from damaged QR codes on the pharmaceutical sorting conveyor line based on the Forni algorithm and the layout of the computer vision system of the industrial conveyor line and the software module of the recognition and identification system of packages on the pharmaceutical sorting line based on QR codes obtained in the work were implemented in the production process of the company LLC "Ametrin FC" (act dated 06.12.2024). Also, the method of encoding information by using a polynomial generator in the form of a Reed-Solomon code and the layout of the computer vision system of the industrial conveyor line and the software module of the recognition and identification system of packages on the pharmaceutical sorting line based on QR codes were implemented in the educational process of the Department of Automation and Information Systems of the Kremenchuk Mykhailo Ostrogradsky National University" during lectures and practical classes in the disciplines "Methods of optimizing control processes", "automation of technological processes and production" for the specialty 174 – Automation and computer-integrated technologies and robotics (act dated 20.09.2024). The QR code image frame normalization method, as well as the layout of the computer vision system of an industrial conveyor line and the software module of the package recognition and identification system were implemented in the educational process of the Department of "Information Technologies of Electronic Means" of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic" during lecture and laboratory classes in the discipline "Digital Signal and Image Processing" for specialties 172 Electronic Communications and Radio Engineering and 174 Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics (act dated 15.10.2024). Improved methods of encoding information and decoding it, taking into account the possibility of damage to QR codes on the conveyor line for sorting pharmaceutical products, are used in the educational process of the Kharkiv National University of Radio Electronics at the CITAR Department when conducting lectures and practical classes in the disciplines «Software and hardware complexes and software for automated control systems», «Identification and modeling of

automation objects» and «Automated control systems for robotic production» for applicants of the first (bachelor's) level of higher education in the specialty 151 – Automation and computer-integrated technologies (act dated 06.09.2024). Models and methods of the controlled technological process of the functioning of a shuttle vehicle in automated internal warehouse systems were implemented in the production processes of the KAPELOU company ((Ukraine) (act dated 18.06.2024). The information encoding method and the computer vision system layout for an industrial conveyor line were implemented in the production processes of the KAPELOU company (Germany) (act dated 27.08.2024). Based on the research conducted, 2 patents were obtained: a patent of Ukraine (No. 126885 dated 02/15/2023) and an international patent (Germany, No. 2023042415393600DE dated 04/24/2023)

The results of the dissertation work are quite fully presented in 20 scientific works of the author on the topic of the dissertation, including: 8 articles in professional publications, 4 in foreign publications, 4 scientific professional publications of Ukraine (category "B"), 8 abstracts of reports, 2 sections of a monograph, 1 international patent, 1 patent of Ukraine. The works are indexed in the databases Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Keywords: Industry 4.0, automatic control system, reconfigurable manufacturing system, robotic systems, robot manipulator, mobile robot, autonomous mobile robot, automatic sorting conveyor line, automatic sorting line, automatic line, identification, object recognition, object recognition system, user recognition, formalization of pharmaceutical product objects, pharmaceutical products, image processing, Kalman filter, frame normalization, QR code processing, experimental plan, decision making..

A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 Automation and computer-integrated technologies. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

List of applicant's published works

1. Deutsches Patent- und Markenamt «Robotermodul sowie Industrieroboter mit Robotermodul» Aktenzeichen: 20 2023 102 166.2 (№2023042415393600DE від 24.04.2023)
2. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M. Features Of Wave Algorithm Application In Warehouse Logistics Transport Systems. Information systems in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde – European University Press. Riga: ISMA, 2023. – P. 251-261.
3. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O., Demska N., Vzhesnievskyi M. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms In Warehousing 4.0. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2021. № 4 (18). С. 57- 64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>.
4. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M. Shuttle-Based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development . Journal of Natural Science and Technologies. Vol. 2 No. 2 (2023). P.232-237.
5. Yevsieiev V., Nevliudov I., Maksymova S., Omarov M., Klymenko O. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support. Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal, 17, No. 6, - PP: 1073-1088. doi:10.18576/amis/170615.
6. Klymenko O. Концепція роботи алгоритмів машинного навчання на базі методу найближчих сусідів для балансування навантаження на конвеєрних лініях сортування продукції // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 1 (75). – С. 28-30. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.028>.
7. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. (2024), "The “load balancing” and “adaptive task completion” algorithms implementation on a

pharmaceutical sorting conveyor line", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (24), P. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.000>.

8. Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Вжесневський М. О., Клименко О. М. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі. //VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. 140 с. С. 87-88.

9. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O. Development of the QR-Code Frame Processing Method for Sorting Conveyor Lines // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2023. - 165 с. С.158-160.

10. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N., Demska N., Klymenko O. Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine.

11. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Mospan, D., Klymenko, O. Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine.

12. Nevliudov I., Chala O., Botsman I., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture // Proceedings of the XII International Scientific Conference «Functional Basis of Nanoelectronics». – Odesa, September 20-24, 2021. – PP. 74-77.

13. Klymenko, O. (2024). Research On The Application Of The Round Robin Algorithm For Load Balancing On Conveyor Lines In The Pharmaceutical Industry.

Grail of Science, (35), 170–172. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.01.2024.028>.

14. Klymenko O. Research on the Application of Dynamic Programming Algorithm for Load Balancing on Conveyor Lines in the Pharmaceutical Industry / O. Klymenko // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale*, Paris, 1er Mars 2024. Paris-Vinnytsia. P.184-186. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.041>.

15. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., & Klymenko O. Development of a Hardware Module for Programming Microcontrollers Based on the Cortex-M Architecture. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 171–181.

16. Nevliudov I., Maksymova S., Yevsieiev V., & Klymenko O. Using Mecanum Wheels for Radio Shuttle. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 182–187.

17. Nevliudov I., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference*, Kharkiv, October 20-21, 2022: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2022. – 136 p. P. 24-26.

18. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O. Conveyor line development features for pharmaceutical products industrial logistics. Decision support systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2024. 256 p. P.152-174. DOI: <https://doi.org/10.30837/MMP.2024.152>.

19. Nevliudov, I., Maksymova, S., Klymenko, O., & Bilousov, M. (2023). Development of a mobile robot prototype with an interactive control system. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 3(73), 128-133.

20. Patent for invention No. 126885 "Automated warehouse logistics system", registered in the State Register of Inventions of Ukraine on 02/15/2023.

ЗМІСТ

Вступ.....	22
1 Аналіз сучасних методів автоматичного керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції	30
1.1 Аналіз сучасних конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції ..	30
1.2 Аналіз графічного оформлення вторинного та третинного пакування фармацевтичних виробів.	38
1.3 Методи керування роботизованими конвеєрними лініями	43
1.4 Методи розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції	49
1.5 Постановка задач дослідження	56
1.6 Висновки за розділом 1	57
2 Розроблення моделей розпізнавання типів упаковок і методу адаптивності навантаження на конвеєрну лінію	60
2.1 Постановка задачі моделювання формалізації упаковки фармацевтичної продукції.....	60
2.2 Розроблення параметричної моделі формалізації упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії	63
2.3 Розроблення методу адаптивності навантаження на конвеєрну лінію	87
2.4 Висновки за розділом 2.....	122
3 Вдосконалення методів ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції з використанням системи комп'ютерного зору	124
3.1 Удосконалення методу нормалізації кадру зображення QR-коду	124
3.2 Удосконалення методу кодування інформації.....	130
3.3 Метод розкодування інформації з виправленням «помилки» та «описки».	138
3.4 Моделювання різних типів пошкоджень QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції	154
3.5 Багатофакторний експеримент	174
3.6 Висновки за розділом 3.....	183

4 Розроблення математичної моделі автоматичного керування швидкістю конвеєрної лінії та експериментальні дослідження.....	185
4.1 Математична модель автоматичного керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції на базі ПД-регуляторів	185
4.2 Розроблення методики проведення експерименту	196
4.3 Розроблення макета конвеєрної лінії системи автоматичного керування ...	203
4.4 Розроблення системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції.....	229
4.5 Розроблення програми автоматичного керування для системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції.....	234
4.6 Проведення експериментальних досліджень, та аналіз отриманих результатів ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії	242
4.7 Висновки за розділом 4.....	248
Висновки	250
Список використаних джерел	251
Додаток А. Список публікацій здобувача і відомості про апробацію результатів дисертації.....	268
Додаток Б. Приклад нанесення інформації на упаковки фармацевтичної продукції.....	272
Додаток В. Фрагмент коду програми для розрахунку амплітуди помилок на основі вхідних даних.....	273
Додаток Г. Фрагмент коду програми розрахунку амплітуд помилок у QR-кодах з використанням кодів Ріда-Соломона	275
Додаток Ґ. Акти впровадження.....	277
Додаток Д. Патенти.....	284
Додаток Е. Фрагмент програмної реалізації	290

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування автономних роботизованих конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції сприяє підвищенню ефективності та безпеки виробничих процесів, а також зменшенню витрат на персонал та матеріальні ресурси. У контексті сучасних тенденцій, що призводять до цифровізації виробництва та впровадження Індустрії 4.0, розвиток методів керування автономними транспортними системами в фармацевтичному секторі має стратегічне значення для підвищення конкурентоспроможності підприємств. Крім того, з урахуванням специфіки фармацевтичного виробництва, де вимоги до якості, безпеки та точності виробничих процесів є надзвичайно високими, розробка і вдосконалення методів автономного керування транспортними системами є нагальним завданням. Такі дослідження можуть сприяти підвищенню якості та ефективності сортування фармацевтичної продукції, а також забезпечити відповідність виробничих процесів вимогам стандартів якості та безпеки. Враховуючи швидкі темпи розвитку технологій, важливо постійно вдосконалювати методи керування автономними транспортними системами, щоб вони відповідали сучасним вимогам та можливостям техніки, з чого можна зробити висновок про високу актуальність і своєчасність даних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в період з 2021 по 2025 р. на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи (НДР) (ДР № 0121U109909) «Інтелектуальна багатоцільова робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями».

Мета і завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи роботизованої системи сортування за рахунок розробки моделей та методів автоматичного керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних конвеєрних систем сортування фармацевтичної продукції та методів керування роботизованими транспортними системами;
- дослідити існуючі методи розпізнання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції;
- розробити параметричну модель формалізації упаковки для фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії;
- розробити метод адаптивності навантаження на конвеєрну лінію сортування фармацевтичної продукції;
- удосконалити метод нормалізації кадра зображення QR-коду;
- удосконалити метод кодування інформації з покращенням захисту від пошкоджень QR-коду в процесі транспортування фармацевтичної продукції;
- розробити метод розкодування інформації з QR-коду з виправленням «помилки», якщо є пошкодження в процесі транспортування фармацевтичної продукції;
- удосконалити математичну модель керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції з використанням PID регуляторів;
- провести експериментальні дослідження та проаналізувати отримані результати ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування роботизованою конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.

Предметом дослідження є моделі, методи, алгоритмічне та програмне забезпечення системи автоматичного керування процесом сортування фармацевтичних виробів на конвеєрній лінії.

Методи дослідження. В роботі застосовуються наступні методи. Метод опису параметричних моделей використовується для формалізації процесу упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Цей метод дозволяє точно визначити параметри упаковки (наприклад, розміри упаковки, кількість товарів у пачці, швидкість руху конвеєра тощо) і побудувати параметричну модель, яка описує цей процес. Використання параметричних моделей дозволяє проводити аналіз ефективності упаковки, здійснювати оптимізацію процесу та прогнозувати результати в залежності від зміни параметрів. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність та якість упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Метод опису системних рівнянь, що дозволяє спростити подання та опис параметрів та характеристик вторинної та третинної типів упаковки для фармацевтичної продукції. Методи розподілу упаковок за обраними робочими зонами («load balancing» – LB) та розподілу упаковок по всіх робочих зонах дозволяють провести оптимізацію процесу сортування, перерозподілу зусиль робітників для більш ефективного використання часу моделювання та збільшення загальної кількості відсортованих упаковок. Метод нормалізації зображення дає можливість описати динамічні властивості сигналу та їхню класифікацію, він використовує авторегресійну складову та ковзне середнє (MA – moving average) похибки як допоміжну, щоб характеризувати модель авторегресії (Autoregression – AR) при обробці QR-коду. Метод "найближчого сусіда" забезпечує згладжування та збереження деталей зображення, що особливо корисно для QR-коду, де важлива чітка та читабельна структура, особливо у випадку конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції. Використовується метод коду Ріда-Соломона для кодування інформації в QR-коді.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Вперше розроблено параметричну модель формалізації упаковки фармацевтичної продукції, яка на відміну від існуючих дає можливість розпізнати тип упаковки за допомогою базових ознак, що дозволяє створити

умови для проєктування систем автоматизації, що забезпечує можливість скоротити час ідентифікації та сортування фармацевтичної продукції.

2. Вперше розроблено метод адаптивності навантаження на конвеєрну лінію сортування фармацевтичної продукції, який дозволяє розподілити упаковки по робочих зонах роботів-сортувальників таким чином, щоб навантаження було однаковим для кожного робота, це дає можливість удосконалити процес сортування та перерозподілу зусиль роботів для більш ефективного використання часу.

3. Удосконалено метод нормалізації кадру зображення QR-коду за рахунок заміни шумового пікселя середнім значеннями, порахувавши з урахуваннями значень всіх пікселів, що дає можливість покращити розпізнавання інформації на QR-коді при різних зовнішніх параметрах процесу сортування фармацевтичної продукції.

4. Удосконалено метод кодування інформації за рахунок використання поліном-генератора у вигляді коду Ріда-Соломона, що дає можливість покращити зчитування інформації з QR-коду у разі його часткового пошкодження або стертості в процесі сортування фармацевтичної продукції.

5. Отримав подальший розвиток метод розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції на базі алгоритма Форні, що дозволяє виконувати обчислення, спрямовані на визначення коефіцієнтів помилок у переданому QR- коді.

6. Отримала подальший розвиток математична модель керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції з використанням PID регуляторів, що дає можливість стабільного зчитування інформації з QR-коду та узгодити функціонування роботів-сортувальників в часі.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.
Практичне значення результатів роботи. Отримані в роботі метод розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичних товарів на базі алгоритму Форні та макет системи

комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній лінії на базі QR-кодів впроваджено у виробничий процес компанії ТОВ «Аметрін ФК» (акт від 06.12.2024) Також метод кодування інформації за рахунок використання поліном-генератора у вигляді кода Ріда-Соломона та макет системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній лінії на базі QR-кодів впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського» при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Методи оптимізації процесів керування», «Автоматизація технологічних процесів і виробництв» для спеціальності 174 – Автоматизація, та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт від 20.09.2024). Метод нормалізації кадру зображення QR-коду, а також макет системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії та програмний модуль системи розпізнавання та ідентифікації упаковок були впроваджені в освітній процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лекційних та лабораторних занять з дисципліни «Цифрова обробка сигналів та зображень» для спеціальностей 172 Електронні комунікації та радіотехніка та 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт від 15.10.2024). Удосконалені методи кодування інформації та її розкодування з урахуванням можливості пошкоджень QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі КІТАР при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Програмно-технічні комплекси та програмне забезпечення АСУ ТП», «Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації» та «Автоматизовані системи управління роботизованим виробництвом» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології (акт від 06.09.2024). Моделі та методи керованого технологічного процесу функціонування транспортного засоба-шатла в автоматизованих внутрішньо складських системах було впроваджено у виробничі процеси компанії KAPELOU (Україна) (акт від 18.06.2024). Метод кодування інформації та макет системи комп'ютерного зору для промислової конвеєрної лінії було впроваджено виробничі процеси компанії KAPELOU (Німеччина) (акт від 27.08.2024). На базі проведених досліджень отримані 2 патенти: патент України (№126885 від 15.02.2023) та міжнародний патент (Німеччина, №2023042415393600DE від 24.04.2023).

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи представлено в тезах та конференціях:

– Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Вжесневський М. О., Клименко О. М. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. 140 с. С. 87-88 (**тези доповіді, Google Scholar**)

– Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O. Development of the QR-Code Frame Processing Method for Sorting Conveyor Lines // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2023. - 165 с. С.158-160. (**тези доповіді, Google Scholar**)

– Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N., Demska N., Klymenko O. Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine (**тези доповіді, Scopus**)

– Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Mospan, D., Klymenko, O. Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots // IEEE 5th International Conference on Modern

Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine (**тези доповіді, Scopus**)

– Nevliudov I., Chala O., Botsman I., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture // Proceedings of the XII International Scientific Conference «Functional Basis of Nanoelectronics». – Odesa, September 20-24, 2021. – PP. 74-77. (**міжнародні тези доповіді, Google Scholar**)

– Klymenko, O. (2024). Research On The Application Of The Round Robin Algorithm For Load Balancing On Conveyor Lines In The Pharmaceutical Industry. Grail of Science, (35), 170–172. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.01.2024.028>. (**міжнародні тези доповіді, Google Scholar**)

– Klymenko O. Research on the Application of Dynamic Programming Algorithm for Load Balancing on Conveyor Lines in the Pharmaceutical Industry / O. Klymenko // Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 1er Mars 2024. Paris-Vinnytsia. P.184-186. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.041> (**міжнародні тези доповіді, Google Scholar**)

– Nevliudov I., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing // Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference, Kharkiv, October 20-21, 2022: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2022. – 136 p. P. 24-26. (**міжнародні тези доповіді, Google Scholar**)

Публікації. Матеріали дисертації досить повно викладені у 20 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 8 статей в фахових виданнях, 4 в закордонних виданнях, 4 наукових фахових видань України (категорії «Б»), 8 тез доповідей, 2 розділи монографії, 1 міжнародний патент, 1 патент України. Праці індексуються в базах Scopus, Index Copernicus, Google Scholar,

Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Структура та обсяг дисертацій. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 142 найменувань на 17 сторінках та семи додатків на 24 сторінках, а також містить 61 рисунок та 39 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 291 сторінку, включаючи 239 сторінок основного тексту.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОНВЕЄРНОЮ ЛІНІЄЮ СОРТУВАННЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

1.1 Аналіз сучасних конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції

Сучасні конвеєрні лінії сортування фармацевтичної продукції відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності та безпеки виробничих процесів. Вони використовуються для переміщення матеріалів, напівфабрикатів та готової продукції від одного етапу виробництва до іншого. Необхідність в системах автоматизації складів виникає та посилюється одночасно із збільшенням онлайн продаж. З умови великої кількості товарів впливає проблема розпізнавання схожих зовні товарів. Відповідно до цього виникає необхідність використовувати методи штучного інтелекту, в тому числі систем комп'ютерного зору для великих складів [1-5].

Ключові риси сучасних транспортних систем полягають у високій швидкості та точності переміщення, здатності до автоматизації операцій і можливості інтеграції з іншими виробничими системами. Загальний вигляд транспортної системи в фармацевтичному виробництві наведено на рис.1.1

Одним із основних напрямів розвитку транспортних систем є впровадження автономних роботів і автоматизованих пристроїв. Такий підхід сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню витрат на робочу силу та забезпеченню високої якості виробничих процесів. Також важливим аспектом є впровадження систем моніторингу та контролю, які дозволяють в реальному часі відстежувати рух вантажів та уникати можливих аварій чи зупинок виробництва [7-9].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд транспортної системи в фармацевтичному виробництві [6]

Фармацевтична галузь добре реагує на новітні рішення в автоматизації та використанні роботів. Це пов'язано з великим обсягом виробництва однотипної продукції, високою прибутковістю та потребою у дотриманні високих стандартів безпеки виробництва. Крім того, вітчизняні компанії все частіше впроваджують роботів у виробництво [10-11].

Промислові роботи можуть вирішувати різні завдання у фармацевтичному виробництві. По-перше, вони можуть сортувати та відбирати продукцію, переміщувати її з одного етапу виробництва на інший, встановлювати та закручувати кришки, а також укладати продукцію у коробки та накладати їх на піддони. Приклад використання робота маніпулятора FANUC Robot SR-6iA у сортуванні фармацевтичних виробів наведено на рис. 1.2



Рисунок 1.2 – Робота маніпулятора FANUC Robot SR-6iA у сортуванні фармацевтичних виробів на конвеєрній лінії [12]

Конвеєрні системи для медикаментів і фармацевтичних препаратів спеціально розроблені для цього сектора. Ці конвеєри є «екологічно чистими», як і ті, що використовуються в харчовій промисловості. Усі елементи мають утримуватися в чистоті та відповідати всім нормам і ISO, ДСТУ. Одні й ті самі конвеєри можна зустріти як у фармацевтичному виробництві, так і в харчовій промисловості, що зумовлено необхідністю використання «гігієнічних» конвеєрів. Проте додаткові компоненти, як-от сортування, відбраковування, розміри та очищення обладнання, відрізняють їх один від одного. Класифікацію конвеєрних системи для медикаментів і фармацевтичних препаратів, наведено на рис. 1.3.

Модульні конвеєрні стрічки — це різновид конвеєрних стрічок, що складаються з окремих секцій, з'єднаних між собою за допомогою шарнірів або зчіпних елементів. Вони можуть виготовлятися з різноманітних матеріалів, зокрема з пластику або металу, та широко застосовуються в промисловості для транспортування вантажів і продукції. Завдяки модульній конструкції стрічки легко піддаються ремонту — можна швидко замінити пошкоджені елементи, а також змінити її довжину або форму відповідно до потреб виробництва. Серед основних переваг таких стрічок — висока

міцність, гнучкість, зручність обслуговування, а також наявність можливості адаптації до різних виробничих завдань.

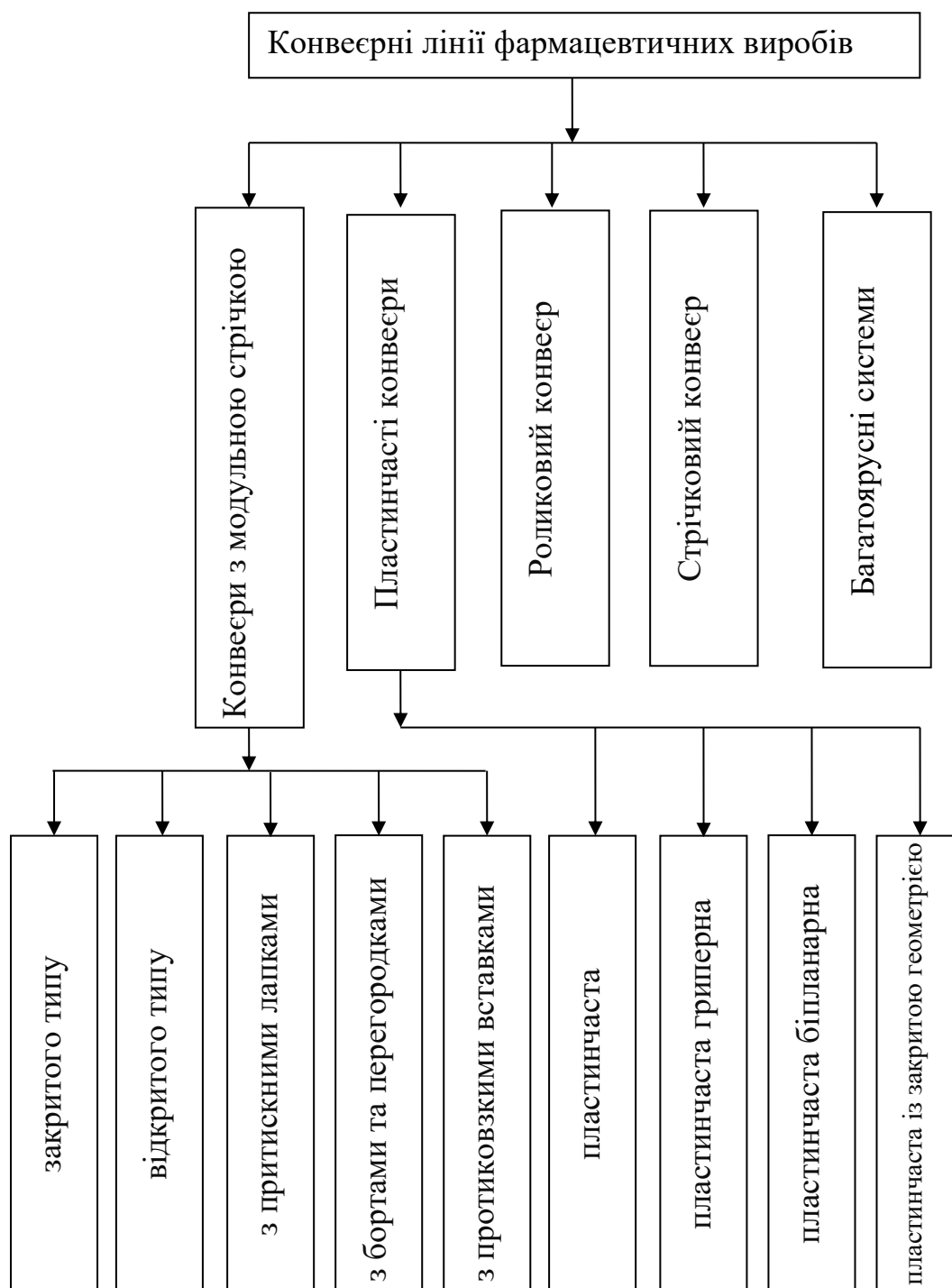


Рисунок 1.3 – Класифікація конвеєрних систем для медикаментів і фармацевтичних препаратів

Зовнішній вигляд модульного стрічкового конвеєру наведено на рис. 1.4.



а)



б)

а) відкритого типу б) закритого типу

Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд модульного стрічкового конвеєру [13]

Пластинчасті конвеєри являють собою різновид конвеєрних систем, у яких для створення суцільної рухомої поверхні використовуються жорсткі пластини, з'єднані між собою ланцюговими або шарнірними механізмами. Пластини можуть виготовлятися з металу, пластику чи інших міцних матеріалів. Такі конвеєри зазвичай використовуються для переміщення важких вантажів. Зовнішній вигляд модульного пластинчастого конвеєру наведено на рис. 1.5.

Роликовий конвеєр — це вид конвеєрної системи, де переміщення вантажів відбувається за рахунок обертових роликів, закріплених на рамі. Ролики виготовляються з різноманітних матеріалів, таких як сталь, алюміній чи пластик, і розміщуються на визначеній відстані один від одного, формуючи безперервну поверхню для транспортування вантажів. Загальний вигляд такого конвеєру наведено на рис. 1.6, а, а технічні характеристики в табл. 1.1.



а)



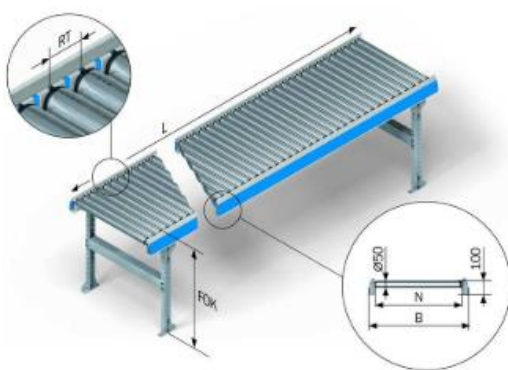
б)

а) пластинчастий конвеєр;

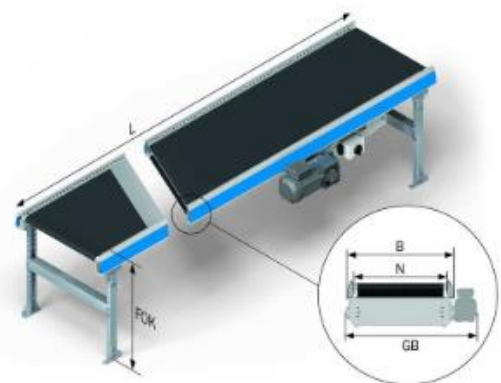
б) пластинчастий конвеєр з модульною стрічкою

Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд модульного пластинчастого конвеєру [14]

Стрічковий конвеєр — це різновид конвеєрної системи, в якій для переміщення вантажів або матеріалів використовується безперервна стрічка. Вона зазвичай виготовляється з міцних матеріалів, таких як ПВХ або поліуретан, гума і натягується між двома чи більше шківками, серед яких один або кілька виконують роль приводу. Загальний вигляд наведений на рис. 1.6б., а технічні характеристики в табл. 1.1



а)



б)

а) фрагмент роликового конвеєра;

б) фрагмент стрічкового конвеєра;

Рисунок 1.6 – Загальний вигляд роликового та стрічкового конвеєра [15]

Таблиця 1.1 – Порівняння базових характеристик роликового та стрічкового конвеєра

Параметри	Значення	
	Роликовий конвеєр	Стрічковий конвеєр
Номінальна ширина (N)	425-625 мм	425-625 мм
Ширина (W)	$N + 80$ мм	$N + 80$ мм
Діаметр ролика	50 мм	—
Висота конвеєра (H)	за запитом	за запитом
Довжина конвеєра	до 21.000 мм	до 21.000 мм
Відстань між роликами	60-90 мм	—
Максимальний кут нахилу	—	18°
Вантажопідйомність	макс. 100 кг	макс. 100 кг
Тип транспортних одиниць	Картонна коробка/лоток	не має значення

Багатоярусні системи конвеєрів — це конвеєрні системи, що складаються з кількох рівнів або ярусів конвеєрів, розташованих один над одним або поруч один з одним, для ефективного транспортування матеріалів або вантажів у вертикальному і горизонтальному напрямках. Такі системи дозволяють оптимізувати використання простору і підвищити продуктивність в умовах обмеженої площі. Загальний вигляд багатоярусної системи конвеєрів наведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд багатоярусної системи конвеєрів [16]

На базі проведеного аналізу проведемо порівняння переваг і недоліків різних конвеєрних систем для сортування фармацевтичних виробів. Результати порівняння наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2 – Порівняння переваг та недоліків різних конвеєрних систем для сортування фармацевтичних виробів

Конвеєрна система	Переваги	Недоліки
Модульні стрічки конвеєрні	Гнучкість конструкції; простота обслуговування; висока міцність; гігієнічність.	Висока вартість; обмежена швидкість
Пластинчасті конвеєри	Міцність та довговічність; стійкість до високих температур; низький рівень зносу	Висока вартість обслуговування; велика вага
Роликовий конвеєр	Простота конструкції; ефективність; низька вартість	Обмеження у використанні; залежність від ручного втручання
Стрічковий конвеєр	Універсальність; ефективність транспортування; регулювання швидкості	Складність обслуговування; вразливість до зносу
Багатоярусні системи конвеєрів	Ефективне використання простору; підвищена продуктивність; гнучкість у налаштуванні	Складність конструкції; висока вартість; складність обслуговування

Вибір конвеєрної системи для сортування фармацевтичних виробів залежить від конкретних потреб і умов експлуатації. Модульні стрічки конвеєрні забезпечують гнучкість і гігієнічність, але мають високу вартість і обмежену швидкість. Пластинчасті конвеєри відрізняються міцністю і стійкістю до високих температур, проте вони дорогі в обслуговуванні і важкі. Роликові конвеєри прості в конструкції та ефективні для транспортування коробок, але не підходять для нестандартних вантажів і залежать від ручного втручання. Стрічкові конвеєри універсальні і дозволяють регулювати швидкість, однак складні в обслуговуванні і швидко зношуються. Багатоярусні системи ефективно використовують простір і підвищують продуктивність, але складні у конструкції, дорогі і важкі в обслуговуванні.

1.2 Аналіз графічного оформлення вторинного та третинного пакування фармацевтичних виробів.

Графічне оформлення вторинного та третинного пакування фармацевтичних виробів має вирішальне значення для їх ідентифікації на конвеєрній лінії сортування. Вторинна упаковка, як правило, включає коробки або блістери, які містять первинну упаковку (пляшечки, ампули тощо), а третинна упаковка – це транспортні коробки або інші засоби для групового перевезення вторинної упаковки. Головним аспектом є забезпечення чіткої та контрастної інформації для сканування та автоматичного розпізнавання. Упаковка повинна містити унікальні ідентифікаційні коди, такі як QR-коди або штрих-коди, розташовані у легко доступних місцях для сканування. Також в роботі [17] розглянуто також смарт-пакування. Цей напрямок набуває значного розповсюдження, але для фармацевтичної продукції в Україні наразі лише починає з'являтися. Ці коди повинні бути нанесені на рівні поверхні без вигинів чи деформацій, щоб запобігти помилкам при читанні. Додатково, важливим є використання яскравих та контрастних кольорів для поліпшення

видимості. Логотипи, назви продуктів, інформація про серії та терміни придатності повинні бути нанесені чітким шрифтом та не перекривати коди ідентифікації. Третинна упаковка повинна також мати чітке маркування зі всією необхідною інформацією для забезпечення швидкої ідентифікації та розподілу продуктів у логістичному ланцюгу. Це включає великі, добре видимі етикетки з основною інформацією про вміст та коди, що дублюють ті, що знаходяться на вторинній упаковці. Усі ці заходи забезпечують ефективність автоматичних систем сортування та знижують ризик помилок при обробці фармацевтичних виробів [18-21]. Загальний вигляд вторинного та третинного пакування з точки зору нанесення графічного позначення та маркування наведено на рис. 1.8.



а)



б)

а) приклад вторинного пакування;

б) приклад третинного пакування

Рисунок 1.8. – Види вторинного та третинного пакування з точки зору нанесення графічного позначення та маркування

Оформлення вторинного та третинного пакування фармацевтичних виробів регулюється низкою стандартів, які забезпечують відповідність продукції вимогам безпеки, ідентифікації та якості. Базові стандарти та накази,

які визначають вимоги до маркування продукції, включаючи фармацевтичні вироби наведено в табл. 1.3

Таблиця 1.3 – Базові стандарти та накази, які визначають вимоги до маркування продукції, включаючи фармацевтичні вироби

Стандарти (накази)	Опис
1	2
Стандарти України	
ДСТУ 4169-2003 "Маркування продукції"[22]	Визначає загальні вимоги до маркування продукції, включаючи фармацевтичні вироби, щоб забезпечити чітку ідентифікацію та інформацію для споживачів.
ДСТУ EN ISO 15378:2017 "Первинне пакування для медичних виробів. Особливі вимоги до застосування ISO 9001:2015"[23]	Встановлює вимоги до системи управління якістю у виробництві первинного пакування, яке впливає на вторинне та третинне пакування.
Наказ МОЗ України № 723 від 29.10.2012 "Про затвердження методичних рекомендацій щодо маркування лікарських засобів"[24]	Регулює вимоги до маркування лікарських засобів, включаючи елементи вторинної та третинної упаковки.
Міжнародні стандарти	
ISO 15378:2017 "Primary packaging materials for medicinal products – Particular requirements for the application of ISO 9001:2015"[25]	Визначає вимоги до первинного пакування та особливості, які впливають на вторинне та третинне пакування.

Продовження таблиці 1.3

1	2
ISO 11607-1:2019 "Packaging for terminally sterilized medical devices"[26]	Визначає вимоги до процесу пакування медичних виробів, включаючи стерилізаційні бар'єри та системи пакування.
GS1 Healthcare standards [27]	Встановлює глобальні стандарти для маркування, відстежування та ідентифікації фармацевтичних виробів, включаючи використання штрих-кодів та QR-кодів.
EU Directive 2011/62/EU (Falsified Medicines Directive) [28]	Регулює вимоги до захисту упаковки від підробок, включаючи обов'язкове використання унікальних ідентифікаторів на вторинній упаковці.
21 CFR Part 211 (Current Good Manufacturing Practice for Finished Pharmaceuticals) [29]	Регламентує вимоги FDA до виробництва, включаючи пакування та маркування фармацевтичних продуктів у США.

Загалом, стандарти України та міжнародні стандарти щодо оформлення вторинного та третинного пакування фармацевтичних виробів спрямовані на забезпечення безпеки, якості та ідентифікації продукції. Вони включають вимоги до чіткого маркування, використання унікальних ідентифікаційних кодів, запобігання підробкам та відповідність системам управління якістю. Ці стандарти забезпечують прозорість логістичних процесів, підвищують ефективність систем автоматичного сортування та знижують ризик помилок, що є критичним для фармацевтичної галузі. Дотримання цих вимог сприяє гармонізації національних регуляторних практик з міжнародними,

забезпечуючи захист споживачів та відповідність глобальним ринковим вимогам [30].

Розглянемо приклад маркування фармацевтичного виробу «Клопідогрел-Тева», який виробляється на заводі «Teva» (Teva Pharmaceuticals), Тель-Авів, Ізраїль, яка наведено на рис. 1.9. Як можна бачити, вторинне пакування фармацевтичного виробу «Клопідогрел-Тева» оформлення відповідно стандарту GS1 Healthcare standards та Наказ МОЗ України № 723 від 29.10.2012 «Про затвердження методичних рекомендацій щодо маркування лікарських засобів». Так як, фармацевтичний виріб «Клопідогрел-Тева» призначений для ринку України, внаслідок цього його оформлення адаптовано під споживача.



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд маркування фармацевтичного виробу (вторинне пакування)

В рамках даних досліджень у представленому загальному вигляді маркування фармацевтичного виробу (вторинне пакування) на рис. 1.9, нас

цікавить використання штрих-коду та QR-коду, для ідентифікації виробу на конвеєрній стрічці сортування. Стандарти рекомендації щодо використання QR-кодів для кодування фармацевтичних виробів містяться в кількох міжнародних стандартах:

GS1 Healthcare standards – цей набір глобальних стандартів регулює використання штрих-кодів, включаючи QR-коди, для ідентифікації та відстеження фармацевтичних виробів. Стандарти GS1 забезпечують єдину систему для ідентифікації продукції та полегшують процеси відстеження та автентифікації.

EU Directive 2011/62/EU (Falsified Medicines Directive) – ця директива Європейського Союзу вимагає використання унікальних ідентифікаторів, які часто реалізуються у вигляді QR-кодів, для забезпечення автентичності лікарських засобів і запобігання підробкам. Використання QR-кодів дозволяє швидко та точно ідентифікувати продукцію на всіх етапах її обігу.

ISO/IEC 18004:2015 «Information technology – Automatic identification and data capture techniques – QR Code bar code symbology specification» – цей стандарт визначає технічні вимоги до використання QR-кодів для автоматичної ідентифікації та збору даних. Хоча він неспецифічний для фармацевтичних виробів, його застосування в цій галузі забезпечує надійне та ефективне кодування інформації.

Використання QR-кодів у фармацевтичній промисловості за цими стандартами допомагає забезпечити прозорість, безпеку та ефективність процесів, пов'язаних з ідентифікацією та відстеженням продукції. Що ще раз доводить актуальність теми дослідження.

1.3 Методи керування роботизованими конвеєрними лініями

В роботі [31] наводиться методика, яка дозволяє розв'язувати задачі кінематики маніпулятора з урахуванням обмежень багатьох допустимих значень, потужності приводу та коефіцієнтів тертя для всіх узагальнених

координат. Однак для розв'язання поставлених задач в даному дослідженні виходячи із специфіки роботи робота-маніпулятора на конвеєрній лінії ця методика не може бути використана в повній мірі. Також особливості динаміки робота маніпулятора в [32]. Але слід зазначити, що при доцільності використання певних положень цього дослідження, інші не можуть бути застосовані в цій роботі через відсутність невизначеності в даних умовах.

В свою чергу, в роботі [33] досліджується керування автоматичною сортувальною лінією. Тут наводиться формалізація всіх етапів нечіткого виведення на базі алгоритму Такагі-Сугено-Канга. Запропоноване рішення є дуже перспективним, але з точки зору використання його для фармацевтичного сортувального конвеєра швидкість прийняття рішень є замалою.

Класифікація методів керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції може бути здійснена за різними критеріями [34-38]. Один із можливих підходів до класифікації може виглядати наступним так, як наведено на рис. 1.10.

Проведемо аналіз наведених методів керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10) з точки зору переваг та недоліків для даних досліджень.

Переваги автоматичного керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10 поз.5) полягають у збільшенні продуктивності та ефективності виробництва, підвищенні точності та якості сортування, зниженні ризику помилок та випадкових пошкоджень продукції, автоматизації процесу без участі людини, що підвищує безпеку виробництва. Серед недоліків виділимо високу вартість встановлення та обслуговування автоматичних систем, складність у використанні та потребу у спеціалізованому навчанні для персоналу, вразливість до несправностей та можливість зупинення виробництва, обмеженість функціональності деяких систем у сортуванні за складними параметрами, потреба у постійній підтримці та оновленні програмного забезпечення.

До переваг використання ідентифікаційних міток (рис. 1.10 поз.6) для сортування треба віднести підвищену точність та швидкість ідентифікації продукції, можливість сортувати продукцію за різними параметрами, збільшення ефективності виробництва, зменшення втрат часу та ресурсів, підвищення рівня автоматизації та безпеки виробництва. В свою чергу, до недоліків віднесемо високу вартість впровадження та обслуговування систем ідентифікації, можливість помилок при ідентифікації, обмеженість у сортуванні продукції без належних ідентифікаційних міток, залежність від правильного функціонування інфраструктури для ідентифікації (наприклад, QR-кодів, Data Matrix або RFID-систем).

При програмованому керуванні роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції (рис.к 1.10 поз.7) виникають такі переваги: точне налаштування роботи системи під конкретні потреби виробництва, велика гнучкість у виборі алгоритмів та стратегій сортування, можливість швидко реагувати на зміни у виробничому процесі, можливість використання додаткового обладнання та технологій для покращення ефективності. Але тут присутні такі недоліки: висока складність розробки та налагодження програмного забезпечення, потреба у спеціалізованому персоналі для програмування та обслуговування системи, вразливість до помилок у програмах, можливість виникнення конфліктів між програмами та недостатньою гнучкістю у вирішенні непередбачуваних ситуацій.

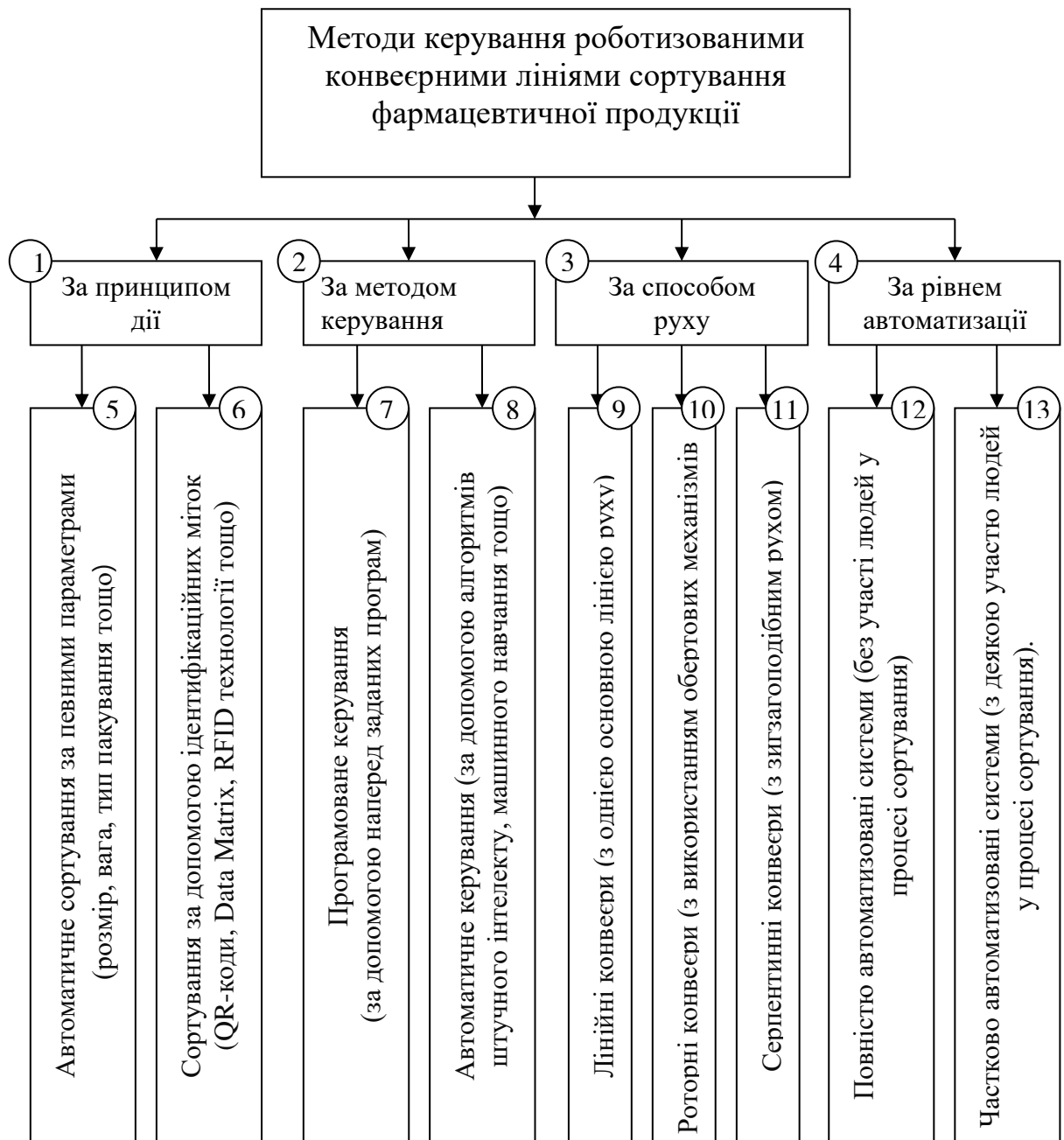


Рисунок 1.10 – Класифікація методів керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції

Серед переваг автоматичного керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10. поз.8) необхідно виділити високу швидкість та точність сортування, здатність адаптуватися до змінних умов виробництва, зменшення людського втручання та помилок, підвищення продуктивності та ефективності виробництва, можливість працювати у нон-стоп режимі, що дозволяє збільшити виробничі потужності.

До недоліків слід віднести витрати на впровадження та обслуговування систем, складність у виборі та налаштуванні алгоритмів, можливість помилок у роботі системи та потребу у постійному контролі та підтримці кваліфікованого персоналу, обмеженість у вирішенні непередбачуваних ситуацій та можливість виникнення конфліктів у роботі системи [38-43].

Лінійні конвеєри для роботизованих систем сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10. поз.9) мають наступні переваги: простота у використанні та обслуговуванні, надійність у роботі, можливість ефективно сортувати продукцію за різними параметрами, такими як розмір, вага чи тип упаковки, а також можливість інтеграції з іншими роботизованими системами. Серед недоліків слід зазначити обмежену гнучкість у роботі та обмеженість у розміщенні та маневреності, можливість утворення заторів у випадку великої кількості продукції, а також високі витрати на модернізацію та розширення системи у випадку зміни потреб виробництва.

При використанні роторних конвеєрів у роботизованих системах сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10 поз.10) з'являються наступні переваги: можливість ефективно сортувати продукцію на великих швидкостях, висока маневреність та гнучкість у роботі, можливість забезпечення неперервного потоку продукції, висока точність сортування за різними параметрами. Але одночасно із перевагами виникають наступні недоліки: складність у використанні та обслуговуванні, висока вартість встановлення та обслуговування системи, високий рівень шуму та вібрацій під час роботи, можливість виникнення зносу та поломок механізмів, а також обмеженість у розміщенні та потужності системи.

До переваг серпантинних конвеєрів у роботизованих системах сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10 поз.11) слід віднести ефективне використання простору завдяки зигзагоподібному руху, можливість сортування продукції за різними параметрами на великій відстані, високу маневреність та гнучкість у роботі, можливість забезпечення неперервного потоку продукції. В той же час до недоліків віднесемо

складність у використанні та обслуговуванні, високу вартість встановлення та обслуговування системи, можливість виникнення заторів у випадку неправильного синхронізації руху різних сегментів конвеєра, обмеженість у швидкості та потужності системи.

Повністю автоматизована система у роботизованих системах сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10 поз.12) передбачає такі переваги: висока швидкість та точність сортування, можливість працювати у нон-стоп режимі, що дозволяє збільшити виробничі потужності, зменшення втрат часу та ресурсів, підвищення рівня автоматизації та безпеки виробництва, здатність ефективно працювати в умовах, що вимагають високої стерильності. Але така система передбачає наступні недоліки: високі витрати на впровадження та обслуговування систем, складність у виборі та налаштуванні алгоритмів, можливість помилок у роботі системи та потребу у постійному контролі та підтримці кваліфікованого персоналу, обмеженість у вирішенні непередбачуваних ситуацій.

До переваг частково автоматизованих систем у роботизованих системах сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10 поз.13) ми відносимо збереження можливості людського контролю та втручання у випадку потреби, зменшення витрат на впровадження та обслуговування порівняно з повністю автоматизованими системами, можливість швидко реагувати на зміни у виробничому процесі, підвищення продуктивності праці людей за рахунок підтримки системи. А до недоліків – складність у взаємодії між автоматизованою та людською працею, можливість помилок у роботі системи через недосконалість алгоритмів або недостатню увагу людей, вимогу до кваліфікації персоналу для ефективної роботи з системою, обмеженість у вирішенні складних завдань через відсутність повного автоматизованого контролю.

Грунтуючись на проведеному аналізі переваг та недоліків методів керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції (рис. 1.10) можна зазначити наступне: вибір напрямку розробки

системи сортування фармацевтичних продуктів на базі сканування QR-кодів та відновлення інформації з пошкоджених кодів за допомогою роботів-маніпуляторів визначається рядом факторів. По-перше, у фармацевтиці важливо точно та швидко ідентифікувати продукцію, що дозволить підвищити рівень безпеки та уникнути помилок у постачанні ліків. Крім того, відновлення інформації з пошкоджених QR-кодів дозволить підтримувати продуктивність системи при наявності пошкоджень під час транспортування.

Обґрунтування вибору цього напрямку базується на наступних моментах. QR-коди та Data Matrix широко використовуються у фармацевтиці через їхню велику інформаційну ємність та зручність для сканування. Роботи-маніпулятори вже успішно використовуються в промисловості для автоматизації процесів, тому їхня імплементація у систему сортування буде логічним кроком. Крім того, методи відновлення інформації з пошкоджених кодів постійно удосконалюються та використовуються у різних галузях, що дозволяє забезпечити ефективність роботи системи навіть у разі пошкодження QR-кодів або Data Matrix.

Таким чином, розробка системи сортування фармацевтичної продукції на базі сканування QR-кодів або Data Matrix та відновлення інформації з пошкоджених кодів з використанням роботів-маніпуляторів є актуальною та обґрунтованою за умови виконання відповідних технічних та програмних вимог.

1.4 Методи розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції

Проблеми ідентифікації розглядаються в багатьох наукових роботах, в тому числі в [44-49]. Ідентифікація та розпізнавання об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції є важливим етапом автоматизації та оптимізації виробничих процесів [50-54]. Для цього використовуються різноманітні методи, основні з яких представлені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4. – Базові методи для розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції

Технологія	Опис
Оптичне розпізнавання	Використання камер та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу зображень і визначення характеристик продукції (наприклад, розмір, форма, колір)
QR-коди, Data Matrix і RFID-мітки	Використання кодів та міток для ідентифікації продукції та зчитування додаткової інформації про них.
Машинне навчання	Використання алгоритмів машинного навчання для розпізнавання і класифікації об'єктів на основі навчальних даних
Системи відеоспостереження	Використання камер та аналіз відеопотоку для виявлення та ідентифікації об'єктів
Автоматизовані системи вагового контролю	Використання вагових сенсорів для вимірювання ваги об'єктів та їх класифікації за цим параметром

Проведемо аналіз та побудуємо таблицю (таблиця 1.5) порівняння переваг та недоліків базових методів розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції.

Таблиця 1.5 – Порівняння переваг та недоліків методів розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції.

Метод	Переваги	Недоліки
1	2	3
Оптичне розпізнавання	Швидкість та висока точність розпізнавання об'єктів.	Залежність від освітлення та умов робочого середовища.
QR-коди, Data Matrix і RFID	Висока інформаційна ємність та можливість зберігання додаткової інформації.	Вимога до точного позиціонування для зчитування.

Продовження таблиці 1.5

1	2	3
Машинне навчання	Адаптивність до змін у виробничому процесі та здатність до самонавчання	Вимога до великої кількості навчальних даних
Відеоспостереження	Адаптивність до змін у виробничому процесі та здатність до самонавчання	Вимога до великої кількості навчальних даних
Ваговий контроль	Точне визначення ваги об'єктів та можливість класифікації за цим параметром	Обмеженість в можливості ідентифікації об'єктів, що мають однакову вагу

Аналізуючи таблицю порівняння методів для розпізнавання й ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції, можна зробити кілька висновків. Оптичне розпізнавання відзначається високою швидкістю та точністю, але вимагає стабільного освітлення та умов робочого середовища. QR-коди, Data Matrix та RFID-мітки вражають високою інформаційною ємністю, але вимагають точного позиціонування для зчитування. Машинне навчання, хоча й має адаптивність та здатність до самонавчання, потребує значної кількості навчальних даних. Відеоспостереження дозволяє віддалено контролювати процес, але вимагає потужного обчислювального обладнання. Ваговий контроль надає точне визначення ваги, але має обмеження в ідентифікації об'єктів з однаковою вагою. Загальною тенденцією є те, що кожен метод має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу повинен здійснюватись з урахуванням специфіки виробництва та вимог до системи. Наприклад, для виробництва з великою кількістю однотипної продукції може бути доцільним використання оптичного розпізнавання або QR-кодів.

QR-код (Quick Response Code) – це двовимірний штрих-код, який складається з чорних квадратів, що утворюють білий фон. QR-код може містити інформацію в числовому, алфавітному та бінарному форматах.

Стандарт використання QR-кодів описано в стандарті ISO/IEC PRF 18004 Information technology Automatic identification and data capture techniques QR Code bar code symbology specification [55]. Існують різні види QR-кодів, які відрізняються за розміром, рівнем захисту та застосуванням, класифікацію QR-кодів наведено на рис. 1.11.

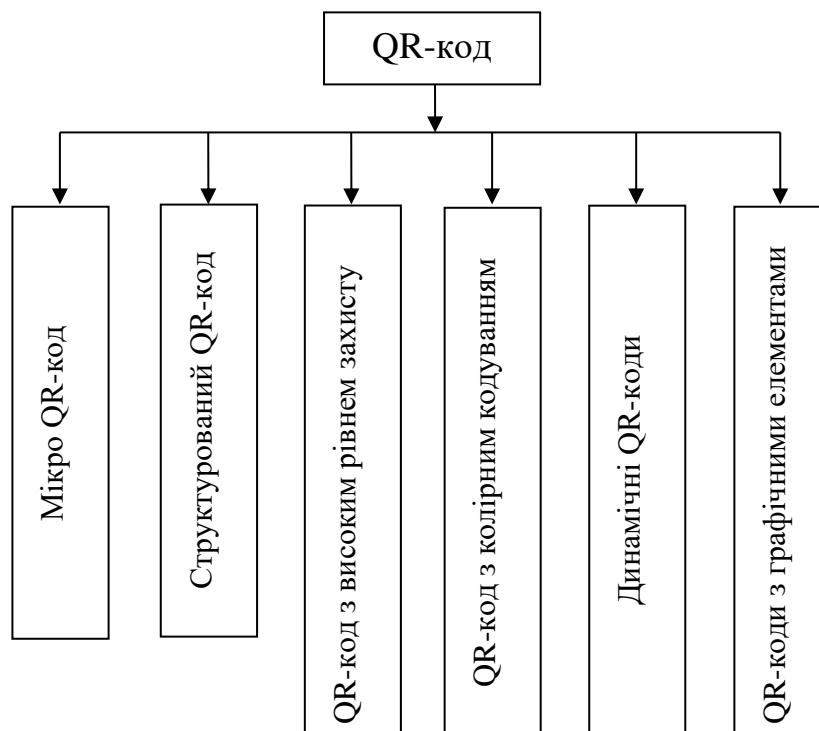


Рисунок 1.11 – Класифікація QR-кодів, які використовуються для маркування фармацевтичної продукції

Мікро QR-код, це менший варіант QR-коду, який має меншу кількість інформації, але може бути використаний у випадках, коли обмежений простір.

Структурований QR-код, цей тип QR-коду містить додаткові поля, які дозволяють структурувати дані, що зберігаються в ньому, наприклад, для обробки даних у вигляді таблиці.

QR-код з високим рівнем захисту, цей тип QR-коду має додаткові захисні шари, що роблять його менш вразливим до пошкоджень або помилок при скануванні.

QR-код з колірним кодуванням, деякі QR-коди можуть містити кольорове кодування, яке дозволяє використовувати різні кольори для

представлення даних, що робить їх більш привабливими або функціональними.

Динамічні QR-коди, ці QR-коди генеруються динамічно та можуть містити змінну інформацію.

QR-коди з графічними елементами, ці QR-коди містять додаткові графічні елементи, такі як зображення або логотипи, що робить їх більш привабливими для користувачів

Приклад QR-кодів наведений на рис. 1.12.

Data Matrix – це двовимірний штрих-код, який зазвичай використовується для кодування текстової інформації. Він складається з чорних квадратів (якщо використовується на білому тлі) або білих квадратів (якщо використовується на чорному тлі), які утворюють певні шаблони [56-61] Стандарт використання Data Matrix кодів описано в стандарті ISO/IEC PRF 18004 Information technology Automatic identification and data capture techniques QR Code bar code symbology specification [55]. Data Matrix може кодувати до кількох тисяч символів і часто використовується для позначення товарів, ідентифікації предметів, а також у логістиці та інших галузях, де потрібно швидко та надійно читати інформацію. Приклад Data Matrix коду наведено на рис. 1.13.



а)



б)



в)



г)



г)

а) мікро QR-код; б) структурований QR-код;

в) QR-код з високим рівнем захисту; г) QR-код з колірним кодуванням;

г) QR-коди з графічними елементами.

Рисунок 1.12 – Приклади QR-кодів



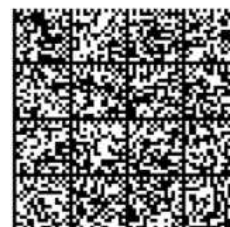
а)



б)



в)



г)

а) DataMatrix № 42; б) DataMatrix № 43;

в) DataMatrix № 57; г) DataMatrix № 65

Рисунок 1.13 – Приклад Data Matrix

Поточним, найбільш надійним і рекомендованим варіантом є ECC 200 (корекція помилок Ріда-Соломона). ActiveBarcode використовує ECC 200 для створення коду Data Matrix. Код Data Matrix буде як і раніше зчитуватися, навіть якщо до 25% його коду закрито або пошкоджено. Код Data Matrix може кодувати до 3116 цифр або до 2335 символів. Залежно від обсягу кодованих

даних використовуються символи різних розмірів. Аналіз типів кодів Data Matrix наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Аналіз типів кодів Data Matrix

Назва	Тип	Опис
1	2	3
DataMatrix	№ 37	У цьому типі завжди обирає найкращий розмір символу, що підходить для кодованих даних. Символи розміром 12x12 і 8x18, а також символи розміром 20x20 і 12x36 містять однакову кількість даних, які вони можуть закодувати. У цьому випадку ActiveBarcode завжди використовує квадратні версії символу матриці даних.
DataMatrix Square	№ 42	У цьому типі завжди обирає найкращий розмір квадратного символу, який підходить для кодованих даних.
DataMatrix Rectangular	№ 43	У цьому типі завжди обирає найкращий прямокутний, неквадратний розмір символу, який підходить для кодованих даних.
DataMatrix <Розмір символу>	з #44 до #73	Ви самі обираєте розмір символу за допомогою типу, наприклад, ви обираєте тип "DataMatrix 18x18", щоб отримати код із розміром символу 18x18.

Порівняння параметрів DataMatrix та QR-кода наведено в табл. 1.7

Таблиця 1.7 – Порівняння параметрів Data Matrix та QR-кода

Параметр	Data Matrix	QR-код
1	2	3
Максимальна місткість	Число: 3116 Буквено-цифрові символи: 2335. Байти: 1556	Число: 7089 Буквено-цифрові символи: 4296. Байти: 2953

Продовження таблиці 1.7

1	2	3
Розмір	Мінімальний – 10x10 клітинок. Максимальний – 144x144 клітинок	Мінімальний – 21x21 клітинок. Максимальний 177x177 клітинок
Виправлення помилок	Закладений алгоритм Ріда-Соломона. Можливість виправлення помилок – 25–33%. Рівень не регулюється	Виправлення помилок у QR-коді налаштовується для того, щоб отримати більше можливостей. Доступно всього чотири рівні для виправлення недоліків, причому для кожного потрібно більше резервних даних, у результаті розмір QR-коду збільшується. Рівень L – на 7%; Рівень M – на 15%; Рівень Q – на 25%; Рівень H – на 30%

Таким чином, проведений аналіз показав актуальність обраної теми дисертаційного дослідження. І дозволив сформулювати задачі дослідження.

1.5 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз показав переваги та недоліки існуючих рішень, що в свою чергу, дало можливість сформульовано низку завдань, спрямованих на вирішення науково-практичних проблем, пов'язаних з оптимізацією процесів ідентифікації, сортування та транспортування фармацевтичної продукції за допомогою автономних роботизованих систем. Одним з основних завдань є розробка параметричної моделі, яка дозволить формалізувати процес упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Ця модель повинна забезпечувати точне розпізнавання типу упаковки на основі базових ознак, що дасть змогу скоротити час на ідентифікацію товарів і значно прискорити

процес їх сортування. Наступним завданням є створення методу адаптивного розподілу навантаження на конвеєрну лінію сортування фармацевтичної продукції. Основна мета цього методу полягає в рівномірному розподілі фармацевтичних упаковок між робочими зонами роботів-сортувальників, що дозволить забезпечити однакове навантаження на кожного робота і, відповідно, оптимізувати їх роботу. Це сприятиме підвищенню ефективності сортувального процесу та раціональному використанню часу роботи роботів. Окремо ставиться завдання удосконалення методу нормалізації кадру зображення QR-коду. Передбачається, що за рахунок усунення шумових пікселів та заміни їх середніми значеннями, враховуючи інформацію з оточуючих пікселів, вдасться покращити якість розпізнавання QR-кодів, що відіграє важливу роль під час різноманітних умов процесу сортування фармацевтичної продукції. Крім того, завданням дослідження є вдосконалення методу кодування інформації в QR-кодах, зокрема шляхом використання поліном-генератора на основі коду Ріда-Соломона. Це рішення сприятиме більш надійному зчитуванню інформації з частково пошкоджених або стертих QR-кодів, що нерідко трапляється в умовах інтенсивного використання конвеєрних ліній. Подальший розвиток отримує метод розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів за допомогою алгоритму Форні. Удосконалення цього методу дозволить підвищити точність визначення помилок у переданих даних, що дасть можливість зменшити втрати інформації під час транспортування продукції. Систематичний аналіз і впровадження зазначених методів забезпечить новий рівень ефективності керування автономними роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції.

1.6 Висновки за розділом 1

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу сучасних методів автономного керування конвеєрними лініями сортування

фармацевтичної продукції, зокрема методам керування роботизованими системами сортування та способам ідентифікації й сортування фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. У результаті аналізу сучасних систем сортування фармацевтичної продукції було встановлено, що основними викликами для їх ефективної роботи є потреба в автоматизації процесів сортування, ідентифікації, пакування, а також забезпечення безперервної роботи конвеєрної лінії. Особливу увагу приділено графічному оформленню вторинної та третинної упаковки фармацевтичних виробів, що вимагає розробки ефективних методів автоматичного розпізнавання різних типів упаковок.

У розділі проведено детальний аналіз існуючих методів керування роботизованими транспортними системами, включно з методами адаптивного розподілу навантаження на конвеєрних лініях. Окремо розглянуто методи ідентифікації об'єктів, зокрема використання QR-кодів для маркування та контролю якості продукції. Усі ці методи мають певні недоліки, що вимагають подальшого вдосконалення, яке сприятиме підвищенню ефективності виробничих процесів на фармацевтичних підприємствах. У табл. 1.8 наведено аналіз та виявлені недоліки, які існують у сучасних методах керування автономними роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції.

На основі проведеного аналізу виявлено недоліки в існуючих рішеннях і сформульовано основні задачі для подальшого дослідження. Зокрема, необхідно вдосконалити методи формалізації упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрних лініях, розробити нові підходи до адаптивного керування навантаженням на сортувальні роботи, а також поліпшити методи нормалізації та кодування інформації в QR-кодах для забезпечення надійного ідентифікаційного процесу навіть у разі пошкодження маркування.

Таблиця 1.8 – Виявлені недоліки, які існують у сучасних методів керування автономними роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції

Метод/Процес	Недоліки
Формалізація упаковки для фармацевтичної продукції	Складність точного розпізнавання різних типів упаковки через варіативність форми та графіки.
Адаптивність навантаження на конвеєрну лінію	Нерівномірний розподіл навантаження між роботами, що призводить до втрат часу і продуктивності.
Нормалізація кадру зображення QR-коду	Шумові пікселі та зовнішні фактори (освітлення, контрастність) знижують якість розпізнавання.
Кодування інформації в QR-коді	Часткове пошкодження або зношування QR-кодів призводить до втрати інформації.
Розкодування інформації з пошкоджених QR-кодів	Високий рівень помилок під час розкодування при значних пошкодженнях QR-коду.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив необхідність удосконалення сучасних методів керування роботизованими конвеєрними лініями сортування фармацевтичної продукції з метою підвищення їх надійності та ефективності.

Основні результати першого розділу опубліковано у роботах [3, 5, 39, 41,45]. Список джерел, які використано у першому розділі, наведено у переліку джерел посилань [1, 2, 4, 6-38, 40, 42-44, 46-61]

2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПІВ УПАКОВОК І МЕТОДУ АДАПТИВНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА КОНВЕЄРНУ ЛІНІЮ

2.1 Постановка задачі моделювання формалізації упаковки фармацевтичної продукції

Good Manufacturing Practices (GMP) [62,63] – це набір стандартів (USA – Code of Federal Regulations (CFR), Title 21, частина 210 і 211, EU-Directive 2003/94/EC, ISO 13485) та керівних принципів, розроблений для забезпечення якості, безпеки та ефективності виробництва у різних галузях, особливо у фармацевтичній, харчовій та косметичній індустріях [63]. Дотримання GMP гарантує, що продукція виробляється з дотриманням певних стандартів, починаючи від сировинних матеріалів до готової продукції. У Good Manufacturing Practices (GMP) питання типів упаковок у фармацевтичному виробництві розглядається у контексті забезпечення якості, безпеки та цілісності продукції. Важливо, щоб упаковка відповідала суворим стандартам, встановленим GMP, щоб запобігти контамінації, забезпечити правильне зберігання та транспортування, а також зберегти ефективність та стабільність фармацевтичних препаратів. Відносно типів упаковок GMP враховує наступні аспекти: стандарти чистоти, матеріали упаковки, захист від зовнішніх впливів, використання сертифікованих постачальників, дотримання правил зберігання та транспортування, ідентифікація та відстеження, документація та записи [64-67]. Розглянемо їх детальніше.

Стандарти чистоти – це вимога, щоб пакувальні матеріали та процеси виробництва упаковки відповідали стандартам чистоти та гігієнічності з метою уникнення потенційної контамінації медикаментів. Матеріали упаковки: мається на увазі використання високоякісних матеріалів упаковки, які не взаємодіють з фармацевтичним продуктом, не викликають

контамінацію та відповідають усім необхідним стандартам. Захист від зовнішніх впливів передбачає, що упаковка повинна забезпечувати захист від зовнішніх факторів, таких як світло, волога та температурні зміни, щоб зберегти стабільність та ефективність фармацевтичних препаратів. Використання сертифікованих постачальників означає, що GMP рекомендує використовувати пакувальні матеріали від сертифікованих постачальників, щоб гарантувати їхню відповідність стандартам та уникнути підроблених матеріалів. Дотримання правил зберігання та транспортування полягає у встановленні стандартів для правил зберігання та транспортування упаковки, щоб мінімізувати ризики пошкодження або контамінації в процесі переміщення продукції ланцюжком поставок. Сенс ідентифікації та відстеження – кожна упаковка має бути чітко ідентифікована, та має забезпечуватися відстеження кожної одиниці продукції від моменту виробництва до моменту використання. Документація та записи означає, що процеси упаковки повинні бути чітко задокументовані, та записи мають бути ведені згідно стандартів GMP для забезпечення прозорості та можливості відстеження

Таким чином, GMP приділяє особливу увагу типу упаковок та всім етапам їх життєвого циклу з метою забезпечення високого рівня якості та безпеки у виробництві фармацевтичної продукції [68-71].

Дослідження типів упаковок у фармацевтичному виробництві має значення для розробки ефективної системи розподілу завдань між роботами на конвеєрній лінії. Різноманітність упаковок, таких як пляшки, блістери та коробки, потребує детального аналізу та класифікації. Математичні залежності, що враховують розміри упаковок, їх обсяги та ваги, можуть бути представлені у вигляді рівнянь. Вимоги до обробки, такі як ступінь делікатності, є ключовим фактором при визначенні оптимальних методів роботи з упаковками.[72-74] Базові типи упаковок для фармацевтичної продукції наведені на рис. 2.1.

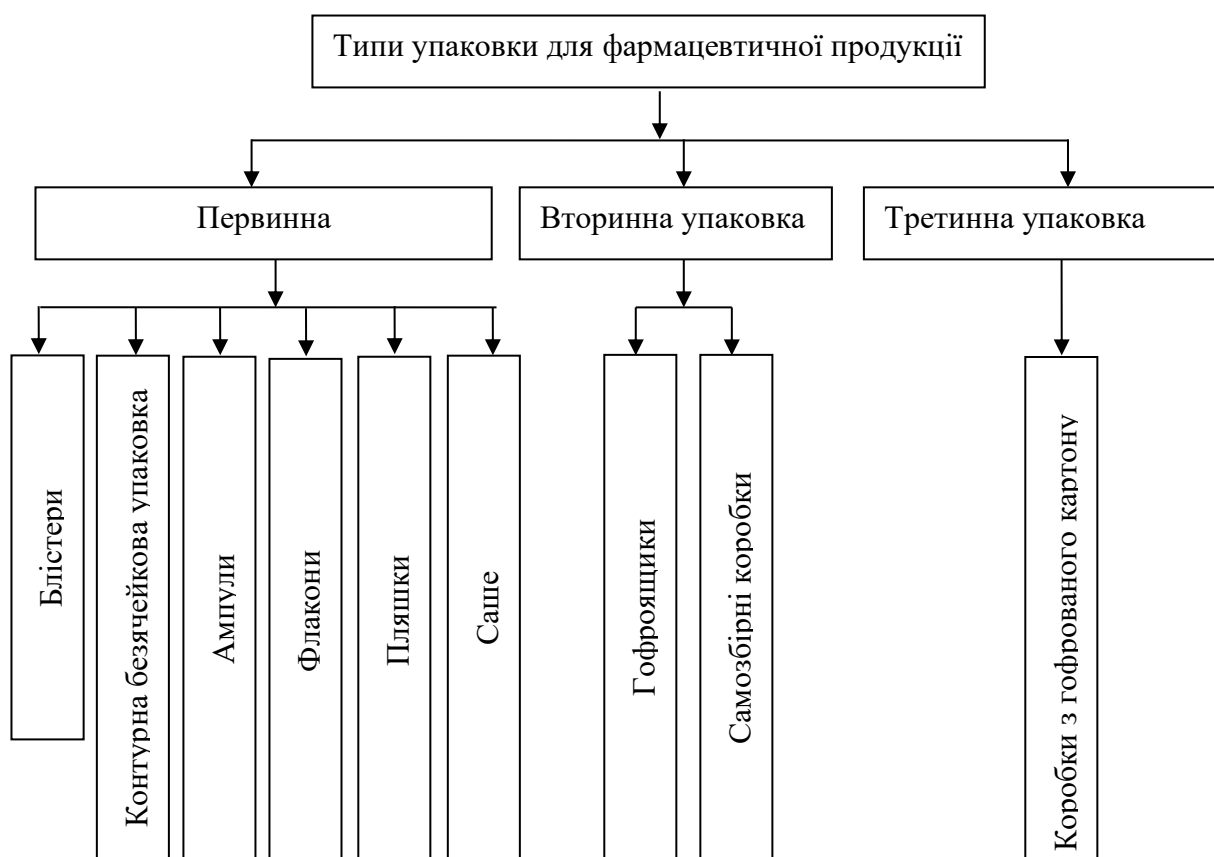


Рисунок 2.1 – Типи упаковок для фармацевтичної продукції

Основними функціями упаковки лікарських засобів є:

- забезпечення захисту продукту від механічних пошкоджень, а також впливу зовнішніх факторів;
- збереження стабільності чутливих компонентів шляхом запобігання їх біологічному розпаду;
- надання необхідної інформації через маркування.

Упаковка фармацевтичної продукції підлягає стандартизації: чітко визначаються вимоги до її параметрів, використовуваних матеріалів та інформаційного оформлення.

Згідно із рис. 2.1, типи упаковок для фармацевтичної продукції можна в рамках даних досліджень можна описати у вигляді наступних понять.

Первинна упаковка, тобто безпосередня тара для лікарського засобу, є першою, з чим має справу споживач. Вона перебуває в прямому контакті з препаратом, тому важливо, щоб її склад не взаємодівав із діючими речовинами

та не змінював їх властивості. Для такого пакування зазвичай використовують матеріали, що є хімічно інертними, зокрема алюміній і полівінілхлорид (ПВХ). У випадку рідких форм або ін'єкційних засобів застосовують ампули та флакони зі скла чи спеціального пластику, які не впливають на стабільність і дозування ліків. Упаковка повинна забезпечувати надійний захист, оскільки її пошкодження може призвести до ризику для здоров'я пацієнта [75-78].

2.2 Розроблення параметричної моделі формалізації упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії

Різновиди первинної фармацевтичної упаковки.

Блістер – контейнер (зазвичай багатодозовий), що складається з двох суцільних шарів, один з яких призначений для вміщування однієї дози. Такий тип упаковки використовується для зберігання твердих лікарських форм, як-от таблетки та капсули. Його виготовляють із матеріалів, таких як пластик, фольга або папір. У блістерах передбачені спеціальні комірки, сформовані під дією температури, куди поміщають препарат, а зворотний бік, виконаний із щільного матеріалу — картону, фольги чи плівки — дозволяє зручно діставати вміст. На поверхні упаковки чітко зазначається вся необхідна інформація про ліки [79-81].

Контурна безячейкова упаковка (стріп) відрізняється від попередньої тим, що не має окремих осередків для вмісту. Препарат розміщується між гнучкими смужками, які щільно запечатуються, забезпечуючи надійне збереження.

Ампули — це герметичні контейнери, виготовлені зі скла або пластику, які захищають вміст від впливу повітря, вологи та сторонніх часток. Герметизація досягається шляхом запаювання при високій температурі. Зазвичай їх використовують для зберігання ін'єкційних препаратів. Це один із більш дорогих типів упаковки.

Флакони, на відміну від ампул, мають більший об'єм і виготовляються зі скла або пластику. Вони призначені для зберігання лікарських засобів у рідкій, твердій або порошкоподібній формах. Для їх герметизації використовуються пробки з гуми, металу або пластику.

Пляшки використовуються для перевезення рідких лікарських засобів, а також капсул і твердих таблеток. Вони часто виготовляються з темного скла або пластику, що дозволяє захистити препарати від шкідливого впливу сонячного світла.

Саше — це тип упаковки для однодозових порцій порошку, гелю або суспензії. Такий пакетик складається з кількох шарів матеріалу, з полімерним покриттям всередині [78-85].

Вторинне пакування використовується для розміщення продукції, що вже знаходиться у первинній упаковці. Це можуть бути гофровані коробки, самозбірні пакування з маркуванням і детальною інформацією, такою як найменування, тип препарату, дані про виробника та спеціальні позначки. Вторинна упаковка забезпечує захист ліків під час транспортування, допомагає у рекламних цілях і полегшує ідентифікацію препаратів без необхідності їх розкриття [82].

Третинне пакування — це упаковка для транспортування, основною метою якої є забезпечення збереження товару під час перевезення. Споживачі її не бачать, але вона має важливе значення, оскільки саме завдяки їй лікарські препарати потрапляють до аптек і медичних установ. Зазвичай для такої упаковки використовують коробки з гофрованого картону різних розмірів і форм [83-90].

Приклад загального виду первинного, вторинного та третинного типів пакування для фармацевтичної продукції наведено на рис. 2.2.

$$N_i = < L_i, W_i, H_i, M_i > \quad (2.1)$$

де L_i – довжина упаковки;
 W_i – ширина упаковки;
 H_i – висота упаковки;
 M_i – параметр ваги.

Виходячи з цього можна записати математичний вираз для об'єму упаковки (V_i) для фармацевтичної продукції, яка знаходиться на конвеєрній лінії, наступним чином:

$$V_i = < L_i \cdot W_i \cdot H_i > \quad (2.2)$$

де L_i – довжина упаковки;
 W_i – ширина упаковки;
 H_i – висота упаковки.

Позначимо через параметр P_i набір властивостей чи характеристик, що характеризують конкретний тип упаковки i . Цей параметр може включати різноманітні аспекти, що впливають на процеси обробки та розподілу завдань на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції. Цей параметр враховує наступні властивості та характеристики упаковки:

$$P_i = < M_i, S_i, F_i, O_i, QR_i > \quad (2.3)$$

де M_i – матеріал упаковки (наприклад, грофований папір, картон, пластик, скло). Різні матеріали можуть вимагати різних методів обробки та можуть мати різні ступені впливу на виробничі процеси;

S_i – ступінь прозорості для упаковок, де важлива видимість вмісту, ступінь прозорості може бути важливим аспектом розробки стратегій розподілу завдань;

F_i – форма упаковки (наприклад, кругла, прямокутна), форма упаковки може впливати на її стабільність у процесі переміщення та обробки на конвеєрній лінії

O_i – особливості відкривання та закривання, різні механізми відкривання та закривання вимагають різних методів обробки, а також можуть впливати на загальну ефективність;

QR_i – етикетування та маркування, наявність етикеток або необхідність маркування може вимагати додаткових кроків у процесі обробки, але дозволяє розпізнати та ідентифікувати товар на базі використання QR-кодів, що дає можливість визначити його вміст для правильного сортування на конвеєрній лінії. Сучасне маркування упаковки готових лікарських засобів (ГЛЗ) в Україні регламентується Наказом МОЗ України № 426 від 26.08.2005 р. із змінами, внесеними Наказами МОЗ України № 536 від 11.09.2007 р. та № 543 від 25.09.2008 р. Відповідно до Наказу МЗ. .2007 р. обов'язкове маркування вторинної упаковки готового лікарського засобу має містити таку інформацію українською мовою (Додаток А): а) найменування країни; б) найменування підприємства-виробника, його товарний знак, адресу; в) найменування лікарського засобу; г) лікарська форма; ґ) кількість лікарського засобу, доза; д) якісна та кількісна характеристика активних інгредієнтів; е) спосіб введення; є) умови зберігання; ж) термін придатності; з) номер серії; и) реєстраційний номер; і) штрих-код.

Параметр P_i є абстракцією, що поєднує ці різні характеристики кожного типу упаковки. Він допомагає створити універсальну систему керування конвеєрною лінією, яка адаптується до різних умов та вимог для ефективної обробки різноманітних упаковок у фармацевтичному виробництві.

Також в рамках даних досліджень введемо параметр вимоги до обробки C_i , що представляє ступінь делікатності або рівень турботи, необхідний для обробки кожного конкретного типу упаковки на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції. Важливо врахувати кілька параметрів щодо вимог до обробки (C_i):

$$C_i = < H_i, T_i, Hu_i, D_i, SR_i > \quad (2.4)$$

де H_i – крихкість упаковки, деякі пакувальні матеріали можуть бути крихкішими, ніж інші. Це може впливати на необхідність обережної обробки, щоб уникнути пошкоджень;

T_i – температурні вимоги, деякі фармацевтичні продукти або упаковки можуть вимагати певних температурних умов, щоб уникнути деградації. Це може включати необхідність зберігання в холодильнику або запобігання перегріву;

Hu_i – чутливість до вологості, деякі пакувальні матеріали або продукти можуть бути чутливими до вологості, що може вимагати особливих умов зберігання та обробки;

D_i – можливість деформації, деякі пакувальні матеріали можуть бути більш схильними до деформації або зминання, що також може впливати на методи їх обробки;

SR_i – спеціальні вимоги щодо складування, деякі упаковки можуть вимагати особливих умов зберігання, наприклад, у темних місцях або під певною температурою.

Ґрунтуючись на вище запропонованих абстрактних описах характеристик та параметрах вторинної та третинної типів упаковки фармацевтичної продукції на конвеєрних лініях, розширимо вираз (2.1) (N_i) шляхом ведення запропонованих параметрів та характеристик з виразів (2.2) – (2.4). Тоді модель опису упаковки для фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії в загальному вигляді матиме такий вигляд:

$$N_i = < L_i, W_i, H_i, M_i, V_i, P_i, C_i > \quad (2.5)$$

де N_i – різні типи упаковок;

L_i – довжина упаковки;

W_i – ширина упаковки;

H_i – висота упаковки;

M_i – параметр ваги;

V_i – об'єм упаковки;

P_i – набір властивостей або характеристик, що характеризують конкретний тип упаковки N_i (2.3);

C_i – ступінь делікатності або рівень турботи, необхідний для обробки кожного конкретного типу упаковки на конвеєрній лінії (2.4).

Для формалізації запропонованої концептуальної моделі (2.5) необхідно провести перетворення абстрактного опису, концепцій та взаємозв'язків у явні та формальні структури, які можуть бути математично виражені та алгоритмічно оброблені. Ґрунтуючись на специфіці поставлених завдань у дослідження припустимо, що запропоновані параметри (2.2) – (2.4) можуть приймати ті чи інші типи значень:

- текстовий тип, що використовуватиметься для визначення параметрів, які носять інформаційний характер і служать для текстового опису та подання;

- булевий тип (логічний тип), може приймати два значення: істину (true) або брехню (false), це дозволить формалізувати параметри моделі, які використовують логічну конструкцію в принципі їх роботи;

- цілий тип, використовується для опису значень того чи іншого параметра в діапазоні від -2 147 483 648 до 2 147 483 647 (int), що дозволить задати довірчі інтервали подання даних.

- лінгвістичний тип, що дає можливість провести ідентифікацію параметрів за його належністю, визначається користувачем, та/або має суворо фіксовану назву відповідно до ДСТУ та/або інших міжнародних стандартів.

Для спрощення подання та опису параметрів та характеристик вторинної та третинної типів упаковки для фармацевтичної продукції (N_i), подамо формальне подання у наступному вигляді:

- цілочисельний тип

$$X_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } a_i \leq x_i \leq [\text{значення}] \\ a_i^2, \text{ якщо } [\text{значення}] \leq x_i \leq [\text{значення}] \{ \\ a_i^2, \text{ якщо } [\text{значення}] \leq x_i \leq a_{max} \end{cases} \quad (2.6)$$

де X_i – позначення a - його значення параметрів в моделі відповідно;

$a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n$ – ідентифікатор діапазона значень або лінгвістична змінна;

a_i, a_{max} – граничні значення: $a_i \rightarrow \min; a_{max} \rightarrow \max$;

$[\text{значення}]$ – виділені порогові значення параметра.

– булевий тип

$$X_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } x = [true] \\ a_i^2, \text{ якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.7)$$

де X_i – позначення a - його значення параметрів в моделі відповідно;

$a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n$ – ідентифікатор діапазона значень або лінгвістична змінна;

$[false, true]$ – оператор логічного значення.

– текстовий тип

$$X_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } x = [\text{словосполучення}] \\ a_i^2, \text{ якщо } x' = [\text{словосполучення}] \\ \dots \\ a_i^n, \text{ якщо } x^{n'} = [\text{словосполучення}] \end{cases} \quad (2.8)$$

де X_i - позначення a – його значення параметрів в моделі відповідно;

$a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n$ – ідентифікатор діапазона значень або лінгвістична змінна;

$[\text{словосполучення}]$ – визначення словосполучення.

– лінгвістичний тип

$$X_i = \left\{ \begin{array}{l} a_i^1, \text{ якщо } x = [\text{слово}] \\ a_i^2, \text{ якщо } x' = [\text{слово}] \\ \vdots \\ a_i^n, \text{ якщо } x^n = [\text{слово}] \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

де X_i – позначення a – його значення параметрів в моделі відповідно;

$a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n$ – ідентифікатор діапазона значень або лінгвістична змінна;

$[\text{слово}]$ – визначення лінгвістичного імені, яке визначається особливостями обраного параметра розробленої моделі.

На основі запропонованих формальних подань описів параметрів (2.6) – (2.9) проведемо формалізацію параметрів у моделі (2.5).

Для визначення параметрів габаритних розмірів вторинної та третинної типів упаковки для фармацевтичної продукції необхідно визначити діапазони можливих розмірів упаковок: довжина (L_i), ширина (W_i), висота (H_i). уніфікованим. Як основний модуль прийняті розміри, кратні габаритам міжнародного транспортного піддону 1200×800, мм. Відповідно до цього модуля встановлено такі основні розміри транспортної прямокутної тари (розміри наведені фрагментарно) , мм, як представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні розміри транспортної прямокутної тари для транспортного піддону 1200×800.

L_i						
W_i	1140/1200	1085/1143	1065/1120	1026/1080	1012/1065	972/1023
	950/100	912/960	855/900	...	760/800	...
	...	651/685	...	...	570/600	295/311
	380/400	...	266/280	253/266	...	228/240
	285/300	142/150	142/150	126/133	114/120	95/100

Висота (H_i) обирається з основного розмірного ряду, мм: 171/180; 162/170; 152/160; ...; 50/53; 42/45.

Крім основного модуля розмірів, застосовуються модулі 1200x1000 мм і 1000x800 мм. Зовнішні теоретичні розміри прямокутної упаковки для фармацевтичної продукції вибираються з табличних даних, залежно від розміру транспортної тари та кількості рядів, у результаті визначення розмірів упаковки, визначається відповідно до табл. 2.2

При виборі розмірів враховуються вимоги зберігання (C_i), маса (M_i) та об'єм упаковки (V_i) у транспортній тарі. Крім наведених, допускається використовувати інші розміри. Отже, в рамках даних досліджень, у рамках розробки системи керування роботизованою конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції, пропонується наступна формалізація розмірів упаковок залежно від розміру транспортної тари (TT_i).

Таблиця 2.2 – Визначення розмірів упаковки для фармацевтичної продукції при третинній упаковці.

Розмір транспортної тари, мм	Розмір упаковки, мм, при кількості рядів					
	1	2	3	...	19	20
1140	1140	570	380	...	60	57
760	760	380	253	...	—	38
570	570	285	190	...	—	—

При розмірі транспортної тари $TT_i = 1140$ за умови максимальної кількості рядів 20:

$$L_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 57 \leq x_i < 95 \\ \text{"середня", якщо } 95 \leq x_i < 228 \\ \text{"велика", якщо } 228 \leq x_i \leq 1140 \end{cases} \quad (2.10)$$

При розмірі транспортної тари $TT_i = 760$ за умови максимальної кількості рядів 20:

$$L_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 38 \leq x_i < 76 \\ \text{"середня", якщо } 76 \leq x_i < 152 \\ \text{"велика", якщо } 152 \leq x_i \leq 760 \end{cases} \quad (2.11)$$

При розмірі транспортної тари $TT_i = 570$ за умови максимальної кількості рядів 15:

$$L_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 38 \leq x_i \leq 57 \\ \text{"середня", якщо } 57 < x_i \leq 190 \\ \text{"велика", якщо } 190 < x_i \leq 570 \end{cases} \quad (2.12)$$

Аналогічно математичному опису (2.10) – (2.12) довжини упаковки (L_i), опишемо і ширину (W_i).

При розмірі транспортної тари $TT_i = 1140$ за умови максимальної кількості рядів 20:

$$W_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 57 \leq x_i < 95 \\ \text{"середня", якщо } 95 \leq x_i < 228 \\ \text{"велика", якщо } 228 \leq x_i \leq 1140 \end{cases} \quad (2.13)$$

При розмірі транспортної тари $TT_i = 760$ за умови максимальної кількості рядів 20:

$$W_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 38 \leq x_i < 76 \\ \text{"середня", якщо } 76 \leq x_i < 152 \\ \text{"велика", якщо } 152 \leq x_i \leq 760 \end{cases} \quad (2.14)$$

При розмірі транспортної тари $TT_i = 570$ за умови максимальної кількості рядів 15:

$$W_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 38 \leq x_i \leq 57 \\ \text{"середня", якщо } 57 < x_i \leq 190 \\ \text{"велика", якщо } 190 < x_i \leq 570 \end{cases} \quad (2.15)$$

Запропоновані математичні залежності (2.10) – (2.15) дозволяють формалізувати параметри L_i та W_i розмірів упаковок залежно від розміру транспортної тари, з якої фармацевтична продукція потрапляє на конвеєрну лінію для подальшого сортування.

Далі необхідно формалізувати висоту упаковки H_i . Як було описано вище, цей параметр можна описати наступним виразом

$$H_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 50 \leq x_i < 100 \\ \text{"середня", якщо } 100 \leq x_i < 150 \\ \text{"велика", якщо } 160 \leq x_i \leq 180 \end{cases} \quad (2.16)$$

Грунтуючись на запропонованих моделях (2.10) – (2.16) опису L_i , W_i , H_i дозволяє формалізувати описи об'єму упаковки (V_i) відповідно до моделей (2.2) і (2.5). Виходячи з цього об'єм упаковки (V_i) для транспортної тари $TT_i = 1140$ можна подати у вигляді:

$$V_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 162450 \leq x_i < 902500 \\ \text{"середня", якщо } 902500 \leq x_i < 7797600 \\ \text{"велика", якщо } 7797600 \leq x_i \leq 233928000 \end{cases} \quad (2.17)$$

Аналогічно (2.17) можна формалізувати опис об'єму упаковки (V_i) для транспортної тари $TT_i = 760$ і $TT_i = 570$ відповідно:

$$V_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 72200 \leq x_i < 577600 \\ \text{"середня", якщо } 577600 \leq x_i < 3465600 \\ \text{"велика", якщо } 3465600 \leq x_i \leq 103968000 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$V_i = \begin{cases} \text{"маленька", якщо } 72200 \leq x_i < 324900 \\ \text{"середня", якщо } 324900 \leq x_i < 5415000 \\ \text{"велика", якщо } 5415000 \leq x_i \leq 58482000 \end{cases} \quad (2.19)$$

Наступним кроком проведемо формалізацію параметра P_i (2.3) як набору властивостей або характеристик, які характеризують конкретний тип упаковки i . Відповідно до рисунку 2.1 параметр матеріал упаковки можна представити в наступному вигляді:

$$M_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } x = [\text{гофрований_папір}] \\ a_i^2, \text{ якщо } x' = [\text{картон}] \\ a_i^3, \text{ якщо } x'' = [\text{пластик}] \\ a_i^4, \text{ якщо } x''' = [\text{скло}] \end{cases} \quad (2.20)$$

В табл. 2.3 наведено порівняльний аналіз опису факторів, що впливають на вибір матеріалів упаковки для фармацевтичних продуктів.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз опису факторів, що впливають на вибір упаковки для фармацевтичних продуктів

Фактори (a_i^n)	Гофрований папір	Картон	Пластик	Скло
1	2	3	4	5
Безбека та захист продукта	+	+	+	+
Бар'єрні властивості	– /+	– /+	+	+
Естетика та брендування	–	+	+	+
Функціональність і зручність використання	–	+	+	–
Екологічні аспекти	+	+	– /+	+
Тип продукту	– /+	– /+	+	+

Вибір матеріалів упаковки у фармацевтичній промисловості суттєво впливає на ефективність процесу сортування на конвеєрних лініях. Перш за все це використання матеріалів, здатних проходити через системи детекції, таких як рентгенівські та металодетектори, забезпечує точність та безпеку

процесу сортування. Також мають значення вага та обсяг, легкі та міцні матеріали, такі як пластик, зменшують загальну вагу упаковки, що полегшує процес транспортування та сортування. Слід обов'язково приділити увагу бар'єрним властивостям, тобто матеріалам з бар'єрними властивостями, такими як скло, які можуть запобігати впливу зовнішніх факторів на продукти, що важливо при сортуванні в умовах змінного середовища. Необхідно враховувати розмір та форму упаковки, через те, що стандартизовані розміри та форми упаковки (наприклад, квадратні коробки) полегшують механізоване сортування на конвеєрних лініях. Також важливим є те, що прозорі матеріали, такі як пластик, дозволяють візуально ідентифікувати вміст упаковки без необхідності розпакування, прискорюючи процес сортування. Матеріали мають бути стійкими до впливу навколишнього середовища; вибір екологічно стійких матеріалів знижує негативний вплив упаковки на навколишнє середовище та відповідно покращує загальну ефективність процесу. Матеріали з низькою можливістю електростатичного заряду можуть зменшити притягування пилу та частинок до поверхні упаковки, що знижує ризик пошкодження продукту та полегшує його сортування. Ми маємо зазначити важливість інтеграції RFID-технологій або QR-кодів, бо використання матеріалів, сумісних з RFID-мітками, може покращити трасування та ідентифікацію продуктів у процесі сортування. Нарешті, матеріали мають бути механічно міцними, тому що міцні матеріали, такі як картон, забезпечують надійність упаковки у процесі сортування, запобігаючи пошкодженню продукту;

Вибір правильних матеріалів упаковки з урахуванням перерахованих факторів оптимізує процес сортування, знижує ризик помилок та забезпечує безпеку та ефективність у фармацевтичній логістиці.

S_i – ступінь прозорості для упаковок фармацевтичних виробів має важливе значення. В контексті видимості вмісту, а також у стратегіях сортування на конвеєрній лінії можна представити у вигляді наступного виразу:

$$S_i = \begin{cases} \text{"прозора"}, \text{якщо } x = [true] \\ \text{"непрозора"}, \text{якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.21)$$

де $x = true$ – упаковка є прозорою, що дозволяє бачити вміст без відкриття або додаткового сканування. Це корисно для візуального контролю і може допомагати автоматичним системам на конвеєрній лінії швидко ідентифікувати продукти або контролювати їх стан;

$x = false$ – упаковка є непрозорою, що вимагає використання маркування (наприклад, QR-кодів або штрихкодів) для ідентифікації вмісту упаковки, оскільки його неможливо побачити без додаткових засобів.

Ступінь прозорості упаковки для фармацевтичних виробів має важливе значення у контексті видимості вмісту, а також у стратегіях сортування на конвеєрній лінії. Прозорість впливає на такі процеси: ідентифікація продукту, швидкість сортування, трасування продукту, контроль якості, дотримання правил і стандартів, безпека, споживчий досвід.

Прозоре пакування дозволяє візуально ідентифікувати продукти без необхідності розпакування. Це особливо корисно при сортуванні продукції, коли потрібна швидка та точна ідентифікація. Також прозорі матеріали упаковки забезпечують більш швидке та ефективне сортування, оскільки немає потреби у додаткових кроках для ідентифікації продуктів. Такі упаковки можуть полегшити трасування продуктів через логістичну ланцюжок, оскільки бирки або коди можуть бути легко видно без розкриття упаковки. Видимість вмісту через прозору упаковку полегшує візуальний контроль якості продукції на етапі сортування. Це дозволяє операторам швидко виявляти дефекти чи невідповідності. Дотримання правил і стандартів, у певних сферах, таких як фармацевтична індустрія, існують правила та стандарти щодо видимості та ідентифікації продуктів. Прозора упаковка може сприяти виконанню цих вимог. Прозорі упаковки можуть підвищити безпеку, що дозволяє операторам легко виявляти будь-які незвичайні або підозрілі

предмети в упаковці. Нарешті, для деяких фармацевтичних продуктів, таких як вітаміни або ліки без рецепта, прозора упаковка може створити позитивний споживчий досвід, що дозволяє покупцям легко бачити продукт та інформацію про нього.

Отже, прозорість упаковки впливає не тільки на візуальне подання продукту, але також на ефективність та безпеку процесів сортування на конвеєрній лінії, що є важливим для оптимізації логістичних операцій та задоволення потреб споживачів. Але варто зауважити, що при сортуванні фармацевтичних виробів на рівні вторинного та третинного пакування, найчастіше використовуються на прозорі упаковки виконані з використанням наступних матеріалів: гофрований папір, картон, пластик.

F_i – форма упаковки (наприклад, кругла, прямокутна), форма упаковки може впливати на її стабільність у процесі переміщення та обробки на конвеєрній лінії. В рамках даних досліджень представимо її у наступному вигляді:

$$F_i = \begin{cases} \text{"Прямокутна упаковка", якщо } x = L_i \cdot W_i \\ \text{"Кругла упаковка", якщо } x' = \pi R^2 \\ \text{"Циліндрична упаковка", якщо } x'' = \pi R^2 h \\ \text{"Кубічна упаковка", якщо } x''' = a^3 \\ \text{"Сферична упаковка", якщо } \bar{x} = \frac{4}{3} \pi R^2 \end{cases} \quad (2.22)$$

де L_i – довжина упаковки;

W_i – ширина упаковки;

R – радіус упаковки;

h – висота упаковки;

a – довжина ребра упаковки;

Вираз (2.22) дозволяє оцінити характеристики упаковки та передбачити її поведінку на конвеєрній лінії. Наприклад, упаковки з великою площею основи та низьким центром маси зазвичай більш стабільні під час переміщення.

При розробці стратегій сортування враховуються такі параметри, як форма, розміри та матеріал упаковки, щоб забезпечити ефективну та безпечну обробку на конвеєрній лінії фармацевтичних виробів.

O_i – особливості відкривання та закривання, різні механізми відкривання та закривання вимагають різних методів обробки, а також можуть впливати на загальну ефективність;

$$O_i = \begin{cases} \text{"}\epsilon\text{_особливості"}\text{"}, \text{если } x = [true] \\ \text{"}\text{нема_особливостей"}\text{"}, \text{если } x = [false] \end{cases} \quad (2.23)$$

де $x = true$ – упаковка має особливості відкривання та закривання, наприклад, наявність спеціальних замків, клапанів, кришок або захисних елементів. Це може вимагати додаткових етапів у процесі автоматичної обробки або уваги з боку працівників при зберіганні, транспортуванні чи сортуванні;

$x = false$ – упаковка не має особливостей відкривання та закривання, що означає, що вона стандартна і не потребує додаткових дій або спеціального обладнання для її обробки.

" ϵ _особливості", деякі фармацевтичні вироби можуть мати упаковки з особливими механізмами відкриття, наприклад, безпечні замки або багаторазові кришки, які ускладнюють доступ або потребують специфічної обробки. Це може впливати на час і спосіб автоматичного сортування. Роботам-маніпуляторам може знадобитися спеціальне програмування для роботи з такими упаковками. "Нема_особливостей", якщо упаковка не має особливих вимог до відкривання або закривання, процес обробки на конвеєрній лінії є простішим. Це дозволяє використовувати стандартні процедури сортування та маніпуляції. Виходячи з цього упаковки з особливостями відкривання, якщо вироби мають спеціальні механізми відкривання або закривання, роботи або системи сортування повинні бути налаштовані для обробки таких елементів. Це може включати додаткові сенсори або маніпулятори, що вплине на загальну швидкість обробки. Такі

упаковки можуть вимагати більш ретельної перевірки перед відправкою для того, щоб вони не були пошкоджені або неправильно закриті. Стандартні упаковки, якщо особливих механізмів відкривання/закривання немає, процес сортування та пакування стає більш прямолінійним і швидшим. Такі упаковки можуть оброблятися більш універсальними методами без необхідності в додаткових налаштуваннях робіт або технічного обладнання. Використання цих параметрів дозволяє налаштовувати конвеєрну лінію на різні типи упаковок, підвищуючи її ефективність та адаптованість до вимог фармацевтичної продукції.

QR_i – етикетування та маркування. Наявність етикеток або необхідність маркування може вимагати додаткових кроків у процесі обробки, але дозволяє розпізнати та ідентифікувати продукцію на базі використання QR-кодів, що дає можливість визначити його вміст для правильного сортування на конвеєрній лінії.

$$QR_i = \begin{cases} \text{"QR-код", якщо } x = [true] \\ \text{"Штрихкод", якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.24)$$

де $x = true$ – це параметр вказує на те, що товар має QR-код. У цьому випадку система на конвеєрній лінії може автоматично сканувати код для швидкого розпізнавання та ідентифікації продукції, що полегшує сортування та керування продуктами;

$x = false$ – це означає, що товар має штрих код. Штрих код також дозволяє ідентифікувати продукцію, проте може бути менш інформативним та вимагати додаткових кроків для отримання інформації порівняно з QR-кодом.

C_i – ступінь делікатності або рівень турботи, необхідний для обробки кожного конкретного типу упаковки на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції, як представлено у виразі (2.4).

Проведемо формалізацію наступних параметрів відповідно до запропонованих формальних подань (2.6) – (2.9).

Hr_i - крихкість упаковки, деякі пакувальні матеріали можуть бути більш крихкими, ніж інші. Це може впливати на необхідність обережної обробки, щоб уникнути пошкоджень;

$$Hr_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } 0,5 \leq x_i \leq 1,0 \\ a_i^2, \text{ якщо } 1,0 < x_i \leq 1,5 \\ a_i^3, \text{ якщо } 1,5 < x_i \leq 2,0 \end{cases} \quad (2.25)$$

де a_i^1 – мінімальний рівень крихкості (стійкі упаковки), який діє в межах $0,5 \leq x_i \leq 1,0$;

a_i^2 – середній рівень крихкості $1,0 < x_i \leq 1,5$;

a_i^3 – максимальний рівень крихкості $1,5 < x_i \leq 2,0$.

То б то a_i^1 застосовується до упаковок, які можна обробляти без обережності, наприклад, з міцного пластику, a_i^2 – застосовується для середньо-крихких, відповідно a_i^3 дуже крихких упаковок, як-от скляні або тонкі полімерні упаковки, які потребують делікатної обробки.

T_i – температурні вимоги, деякі фармацевтичні продукти або упаковки можуть вимагати певних температурних умов, щоб уникнути деградації. Це може включати необхідність зберігання в холодильнику або запобігання перегріву;

$$T_i = \begin{cases} a_i^1, \text{ якщо } 2 \leq x_i \leq 8 \\ a_i^2, \text{ якщо } 8 < x_i \leq 25 \\ a_i^3, \text{ якщо } 25 < x_i \leq 40 \end{cases} \quad (2.26)$$

де a_i^1 – це рівень для продуктів, які потребують зберігання при низьких температурах (2–8 °C). Цей інтервал відповідає умовам холодильного зберігання, що критично для вакцин, біологічних препаратів та деяких ліків;

a_i^2 – це рівень для продуктів, які можуть зберігатися при кімнатній температурі (8–25 °C). Багато фармацевтичних продуктів, таких як таблетки або капсули, можуть зберігатися в цьому інтервалі без ризику деградації;

a_i^3 – це рівень для продуктів, які можуть витримати підвищені температури (25–40 °C). Проте, якщо температура піднімається вище цього рівня, це може викликати деградацію продукту. Така температура може зустрічатися в тропічних або жаркому кліматі.

Температурні вимоги залежать від властивостей фармацевтичних препаратів: деякі з них є чутливими до високих або низьких температур і повинні зберігатися у відповідних умовах, щоб зберегти свою ефективність. Низькотемпературний інтервал (2–8 °C) підходить для продуктів, які повинні бути зберіганні в холоді для запобігання хімічній деградації, а середній температурний діапазон (8–25 °C) підходить для стабільних продуктів.

Hu_i – чутливість до вологості, деякі пакувальні матеріали або продукти можуть бути чутливими до вологості, що може вимагати особливих умов зберігання та обробки;

$$Hu_i = \begin{cases} \text{"чутливо", якщо } x = [true] \\ \text{"ні", якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.27)$$

де $x = true$ – це параметр, який вказує, що продукт або упаковка чутливі до вологості. У цьому випадку потрібні особливі умови зберігання або обробки для запобігання пошкодженню або втраті якості. Чутливі до вологості матеріали можуть включати ліки у формі порошків, гігроскопічні препарати або деякі полімерні пакувальні матеріали, які легко поглинають вологу.

$x = false$ – параметр вказує, що продукт або упаковка не є чутливими до вологості. У цьому випадку звичайні умови зберігання будуть достатніми, і не потрібні додаткові заходи захисту від вологості.

"Чутливо", це означає, що упаковка або продукт потребують захисту від впливу вологи. Такі умови можуть включати герметичну упаковку, використання осушувачів, або контроль вологості в приміщенні, де зберігається ця продукція. Чутливі продукти можуть втрачати свої властивості або ефективність через поглинання вологи. "Ні", вказує на відсутність потреби

в спеціальному контролі вологості для даного продукту або упаковки. Вологість не впливає на їх якість або стабільність.

Система (2.27) дозволяє чітко класифікувати фармацевтичні вироби або упаковки за ступенем чутливості до вологості, що полегшує керування умовами зберігання на конвеєрній лінії сортування.

D_i – можливість деформації, Деякі пакувальні матеріали можуть бути більш схильними до деформації або зминання, що також може впливати на методи їх обробки;

$$D_i = \begin{cases} \text{"можливо"}, \text{якщо } x = [true] \\ \text{"ні"}, \text{якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.28)$$

де $x = true$ – це параметр, який вказує, що пакувальний матеріал схильний до деформації. Це може стосуватися тендітних або м'яких упаковок, які можуть легко зминатися або пошкоджуватися під час транспортування або обробки. У такому випадку слід застосовувати обережні методи транспортування, щоб уникнути пошкоджень;

$x = false$ – параметр означає, що пакувальний матеріал не схильний до деформації. Це можуть бути більш міцні або жорсткі матеріали, які не піддаються змінюванню форми під впливом механічних факторів.

"Можливо" – пакувальний матеріал може деформуватися під час обробки або транспортування. Це може включати матеріали, такі як картон, м'які пластики або паперові упаковки. Такі матеріали вимагають обережного поводження, наприклад, використання автоматичних роботів, які можуть контролювати тиск на упаковку. "Ні", пакувальний матеріал не схильний до деформації. Це можуть бути жорсткі пластики, скляні або металеві упаковки, які мають високу стійкість до зминання та деформації. У такому випадку можна використовувати стандартні методи обробки без ризику пошкодження.

Система (2.28) дозволяє автоматичній сортувальній лінії враховувати можливість деформації упаковки при виборі відповідних методів обробки, запобігаючи пошкодженню чутливих матеріалів.

SR_i – спеціальні вимоги до складування, Деякі упаковки можуть вимагати особливих умов зберігання, наприклад, у темних місцях або під певною температурою.

$$SR_i = \begin{cases} \text{"Є"}, \text{якщо } x = [true] \\ \text{"Ні"}, \text{якщо } x = [false] \end{cases} \quad (2.29)$$

де $x = true$ – це параметр, що означає, що упаковка має спеціальні вимоги до зберігання. Це може бути пов'язано з необхідністю зберігання в певних умовах, таких як контроль температури, вологості, або вимоги щодо освітлення (наприклад, зберігання у темних місцях або в умовах зниженої температури);

$x = false$ – параметр вказує на те, що упаковка не має спеціальних вимог до складування. У такому випадку продукція може зберігатися за стандартних умов.

"Є" – якщо упаковка вимагає спеціальних умов зберігання, це може включати:

1. Зберігання при низьких температурах (наприклад, у холодильниках або морозильниках) для фармацевтичних продуктів, які чутливі до тепла.
2. Зберігання в темних місцях, якщо продукти чутливі до світла, що може викликати їхню деградацію.
3. Контроль вологості для продуктів, які можуть пошкодитися через надмірну вологу або сухість.

"Ні", якщо спеціальних вимог немає, упаковка може зберігатися у звичайних умовах, без ризику пошкодження через неправильне складування. Це можуть бути міцні або стабільні матеріали, які не залежать від навколишнього середовища.

Система (2.29) дозволяє роботу або автоматичній системі сортування на конвеєрі розуміти, які продукти потребують спеціальних умов зберігання, і відповідно керувати ними, щоб уникнути псування або деградації фармацевтичних виробів.

Запропонована модель опису пакування для фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії надає основу для розробки системи керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції. В контексті керування ця модель може забезпечити наступні аспекти:

- ідентифікація та класифікація, модель дозволяє реалізувати структурований підхід до ідентифікації та класифікації різних типів упаковок. Це дозволяє системі керування легко визначити, які упаковки знаходяться на конвеєрній лінії, та надає основу для прийняття рішень;

- різноманітність габаритів і характеристик, модель враховує різні габарити та характеристики упаковок, система керування може адаптувати параметри конвеєрної лінії та забезпечити оптимальну та ефективну обробку для кожного конкретного типу упаковки;

- безпека та делікатність, параметр, який враховує делікатність упаковки, може бути основою для налаштування параметрів обробки на конвеєрній лінії, що важливо для запобігання пошкодженням та забезпечення безпечної обробки фармацевтичної продукції;

- оптимізація продуктивності, знання характеристик упаковок дозволяє системі керування оптимізувати продуктивність конвеєрної лінії, мінімізувати час циклу та забезпечувати ефективне використання ресурсів;

- інтеграція з іншими системами, запропонована модель може бути використана для інтеграції з іншими системами у виробничому ланцюжку, такими як системи відстеження та управління запасами, забезпечуючи єдиний та координований процес;

- облік вимог до обробки, розроблена модель та параметричні моделі формалізації параметрів дають можливість приймати рішення системі керування враховуючи вимоги до обробки кожного типу упаковки, що є критичним аспектом у фармацевтичній індустрії з високими стандартами якості;

- гнучкість та розширюваність, розроблена модель та її формалізації надають можливість забезпечити гнучкість для внесення змін до виробничих

процесів, а також можливість легкого додавання нових типів упаковок без необхідності перепроєктування всієї системи керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.

Таким чином, запропонована модель сприяє створенню ефективної та гнучкої системи керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції, що важливо для забезпечення високої якості виробництва та відповідності стандартам безпеки.

Запропонована модель містить параметри, що забезпечують достатність та безнадлишковість ознак для розпізнавання фармацевтичних упаковок на конвеєрній лінії. Достатність моделі полягає у тому, що вона охоплює всі ключові характеристики, які впливають на обробку та сортування упаковок.

Зокрема, параметри розміру упаковки (L_i), (W_i), (H_i) дозволяють точно визначити габарити кожного типу упаковки, що є важливим для оптимізації процесу їх розміщення та транспортування на конвеєрі. Параметр ваги (M_i) враховує масу упаковок, що також має значення для налаштування роботів-сортувальників. Об'єм (V_i), обчислений за формулою (2.2), дає змогу оцінити загальні розміри упаковки і врахувати цей параметр для просторового розподілу упаковок на конвеєрній лінії.

Параметр (P_i) охоплює низку характеристик, що деталізують різні аспекти обробки упаковок, такі як матеріал (M_i), ступінь прозорості (S_i), форма (F_i), особливості відкривання та закривання (O_i), а також наявність етикетування та маркування за допомогою QR-кодів (QR_i). Ці ознаки достатньо універсальні та актуальні для фармацевтичної продукції, оскільки вони враховують не тільки фізичні характеристики упаковки, але й функціональні аспекти, які впливають на процес сортування та транспортування. Наприклад, форма упаковки впливає на її стійкість під час руху по конвеєру, а наявність QR-кодів забезпечує можливість автоматичного розпізнавання та сортування продукції.

Параметр вимог до обробки (C_i) дозволяє врахувати специфічні властивості фармацевтичної продукції, що можуть потребувати особливого

підходу під час сортування. Ознаки крихкості (H_i), температурні (T_i) та вологісні (Hu_i) вимоги, а також чутливість до деформацій (D_i) забезпечують врахування всіх критичних факторів, що впливають на безпеку та якість обробки продукції на конвеєрній лінії. Наприклад, пакування зі скла або інших крихких матеріалів потребують більш обережної обробки, щоб уникнути пошкоджень, тоді як чутлива до температури продукція має зберігатися та переміщуватися за спеціальних умов.

Безнадлишковість моделі забезпечується тим, що кожен параметр чітко визначає конкретну характеристику упаковки, не дублюючи інформацію. Наприклад, параметри розмірів (L_i), (W_i), (H_i) та ваги (M_i) не повторюються в інших характеристиках, а параметри матеріалу, форми, особливостей маркування та умов обробки чітко поділяються за різними аспектами обробки на виробничій лінії.

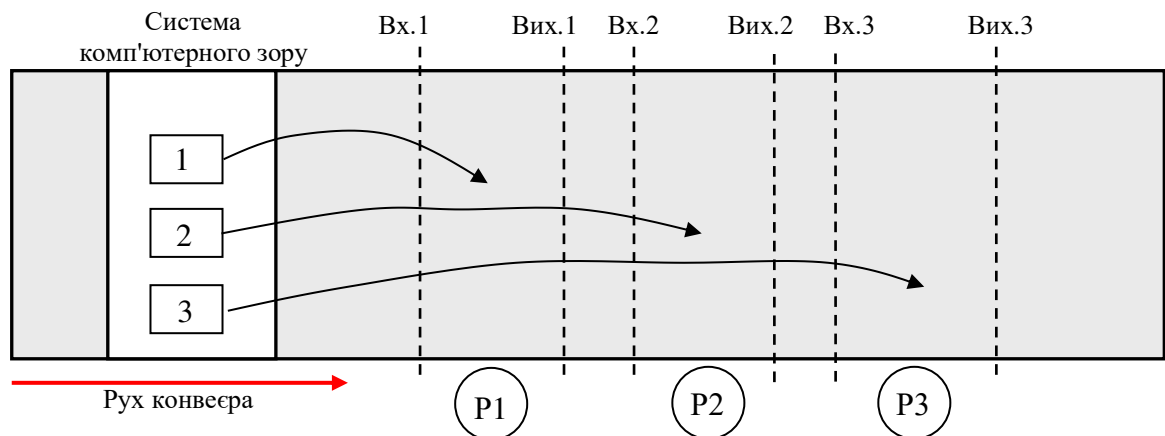
Таким чином, запропонована модель є збалансованою та ефективною для розпізнавання різних типів упаковок у фармацевтичному виробництві на конвеєрній лінії сортування, оскільки вона охоплює необхідні для процесу ознаки і не містить надлишкових параметрів.

2.3 Розроблення методу адаптивності навантаження на конвеєрну лінію

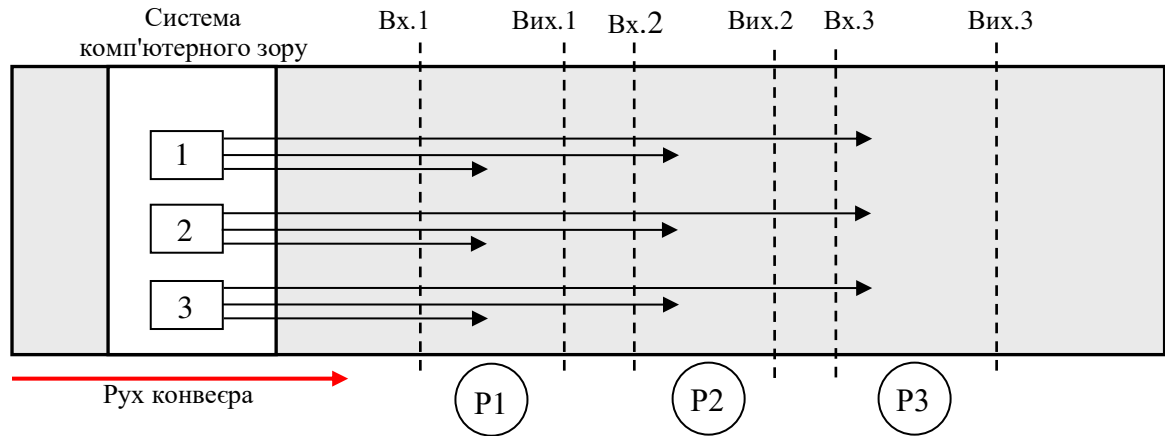
В роботі [94] розглядається розробка моделі рішень для автоматизації процесів сортування. Однак тут не враховується задача балансування навантаження. Розробка адаптивного методу для балансування навантаження на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції є ключовими питаннями у сфері систем керування. В даному дослідженні будемо використовувати результати, набуті науковцями у [95]. Цей вид досліджень фокусується на створенні інтелектуальної системи, здатної динамічно адаптуватися до змін у робочому навантаженні, забезпечуючи ефективний та рівномірний розподіл завдань між роботами на конвеєрі. Актуальність цього напряму досліджень зумовлена нестабільністю у виробничих процесах,

змiнами в обсягах виробництва та вiдмiнностями у вимогах до обробки рiзних типiв фармацевтичних продуктiв. Адаптивний метод надає системi керування гнучкiсть у реагуваннi на цi змiни, оптимiзуючи розподiл завдань та мiнiмiзуючи затримки виконання на конвеєрнiй лiнiї, що дозволяє ефективнiше використовувати ресурси, такі як енергiя та час [96-98]. Так само надає можливiсть динамiчно адаптуватися до поточного навантаження, що сприяє дотриманню високих стандартiв якостi у виробництвi фармацевтичної продукцiї. У рамках цiєї роботи розглянемо такі можливі види розподiлу упаковок по робочих зонах робiтв сортувальникiв, як показано на рис. 2.3.

Уявiмо, що фармацевтичнi вироби пiд номерами 1,2,3 як показано на рис. 2.3 потрапляють у зону систему комп'ютерного зору, в якiй проходить iдентифiкацiя виробу та типу упаковки вiдповiдно до запропонованих параметричних моделей у пiдроздiлi 2.1 [99].



а)



б)

а) розподіл упаковок за обраними робочими зонами (метод LB);

б) розподіл упаковок по всіх робочих зонах (метод АТС)

Рисунок 2.3 – Види розподілу упаковок по робочих зонах роботів-сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування

Далі фармацевтичні вироби переміщуються по конвеєрних лініях і потрапляють в робочу зону роботів сортувальників або ліфта. Дані зони позначені як входи в робочу зону кожного робота або ліфта (Вх. 1; Вх. 2; Вх. 3) і відповідно виходом з них (Вих. 1; Вих. 2; Вих. 3). Через P1, P2, P3 позначені роботи сортувальники або сортувальні ліфти. Розподіл упаковок за обраними робочими зонами (рис. 2.3, а) є стратегією, спрямованою на забезпечення ефективного та рівномірного завантаження сортувальників. Дане рішення контролює поточне навантаження на кожному сортувальнику, ґрунтуючись на отриманих даних: довжина (L_i), ширина (W_i), висота (H_i), матеріал упаковки (M_i), форма упаковки (F_i), отриманих даних з маркування (QR_i) та крихкість упаковки (Hr_i). На відміну від розподілу упаковок по вибраним робочим зонам, реалізацій розподілу упаковок по всіх робочих зонах (рис. 2.3, б) орієнтований на адаптивний та інтелектуальний розподіл завдань з урахуванням поточних умов та вимог виробництва, при цьому параметри: довжина (L_i), ширина (W_i), висота (H_i), матеріал упаковки (M_i), форма упаковки (F_i) та крихкість упаковки (Hr_i) повинні бути максимально

однакові, оскільки будь-який $P_1, \dots, P_3$ може взаємодіяти з упаковкою, сортування проводиться на базі отримання даних з маркування (QR_i) упаковки, в даному випадку це може бути штрих-код, QR-код або RFID мітка. Для визначення відстаней між робочою зоною, типами упаковки та роботом, а також для оцінки характеристик упаковки, пропонується використовувати комбінацію метрик таких як: часова відстань та Хеммінгова відстань. Хеммінгова відстань - це метрика використовується для порівняння дискретних характеристик упаковок, таких як тип упаковки, форма, матеріал тощо, та може бути представлена наступним чином:

$$D = \sum_{i=1}^n 1(a_i \neq b_i)$$

де a_i і b_i – символи на відповідних позиціях двох рядків.

Часова метрика - це метрика визначає час, необхідний для переміщення робота між зоною з упаковкою та робочою зоною. Вона враховує не лише фізичну відстань, але й можливі перешкоди, швидкість робота та час на виконання завдань. Формула даної метрики наступна:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n 1(a_i \neq b_i)}{v}$$

де $\sum_{i=1}^n 1(a_i \neq b_i)$ – Хеммінгова відстань;

v – швидкість робота маніпулятора.

У межах поставлених завдань у цьому дослідженні необхідно розглянути реалізацію методу системи керування даних двох випадків (рис. 2.3, а і рисунок 2.3, б).

Розробимо метод розподілу упаковок за робочими зонами роботів сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок за обраними робочими зонами (рис. 2.3, а).

На першому етапі, коли упаковка потрапляє під систему комп'ютерного зору, необхідно провести ідентифікацію типу упаковки для кожного виробу. Хай I_i – це функція ідентифікації типу упаковки для кожного виробу N_i , де $i = 1, 2, 3$ для різних фармацевтичних виробів. Система комп'ютерного зору використовує набір таких параметрів, як: L_i – довжина упаковки; W_i – ширина упаковки; H_i – висота упаковки; F_i – форма упаковки для визначення типу упаковки. Отже, параметричний вираз для ідентифікації типу упаковки буде виглядати наступним чином:

$$I_i = f(L_i, W_i, H_i, F_i) \quad (2.30)$$

де f – функція, яка може бути реалізована з використанням алгоритмів машинного навчання або комп'ютерного зору.

Приклад: хай $L_1=50$ мм, $W_1 = 90$ мм; $H_1=100$ мм; $F_1=$ «циліндрична упаковка», тоді функція ідентифікації I_1 буде мати наступний вигляд:

$$I_1 = f(50, 90, 100, \text{"циліндрична_упаковка"}) \quad (2.31)$$

Таким чином, функція ідентифікації I_i визначає тип упаковки кожного виробу на основі його характеристик.

Наступним кроком після ідентифікації тип упаковки для кожного виробу на основі його характеристик необхідно реалізувати розподіл фармацевтичних виробів різними входами конвеєрної лінії залежно від результату ідентифікації та типу упаковки. Позначимо через $f(i, j)$ функцію розподілу виробу на вхід конвеєрної лінії, де i – номер виробу, j – номер входу (Вх1, Вх2, Вх3) як показано на рис. 2.3, а. У цьому дослідженні для спрощення, припустимо, що функція розподілу залежить лише від типу упаковки, і ми керуємо напрямом виробів залежно від цього. Нехай I_i – функція, що повертає тип упаковки для виробу i . P_j – пріоритет входу. Тоді математичний опис функції розподілу може виглядати так:

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, \text{якщо } I_i = \text{"Тип1"} \bigcup P_j = \max(P(\text{всі_входи})) \\ 0, \text{в_іншому_випадку} \end{cases} \quad (2.32)$$

де $f(i, j)$ – результат функції в залежності від вхідних параметрів i і j ;
 I_i – функція, що повертає тип для входу i ,
 P_j – функція, що повертає вірогідність для входу j ;
 $\max(P(\text{всі_входи}))$ – максимальне значення вірогідності серед всіх входів.

Приклад: якщо виріб 1 ідентифіковано як "Тип 1", і найкращий вхід для цього типу упаковки – Вх.1, функція розподілу може бути записана як $f(1, \text{Вх.1})$. Варто зауважити, що функція розподілу також може враховувати пріоритети різних типів упаковок або особливості конвеєрної лінії, щоб оптимізувати процес сортування.

З вище написаного можна стверджувати, що прийняття рішень у функції $f(i, j)$ може здійснюватися з допомогою логічних умов:

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, \text{якщо } I_i = \text{"Тип 1"} \bigcup j = \text{Вх.1} \\ 0, \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad (2.33)$$

Варто зауважити, що функція розподілу може бути адаптована в реальному часі в залежності від динамічних змін на конвеєрі та потреб у балансуванні навантаження.

Після розподілу фармацевтичних виробів по різних входах конвеєрної лінії в залежності від результату ідентифікації та типу упаковки, необхідно вирішити, як реалізувати балансування навантаження. Визначимо в рамках даних досліджень, що функція балансування навантаження є прийняттям рішення про те, куди направити кожну упаковку на конвеєрній лінії в залежності від поточного завантаження і пріоритетів. ля ефективного

балансування навантаження на конвеєрній лінії сортування фармацевтичних виробів необхідно враховувати кілька ключових факторів, одним із яких є пріоритет завдань, що визначає, які упаковки мають бути оброблені в першу чергу. Пріоритети завдань можуть варіюватися залежно від типу упаковки, термінів виконання замовлення, терміну придатності продукції, а також інших бізнес-потреб. Діапазон значень пріоритету може бути визначений числовою шкалою, наприклад, від 0 до 1, де:

- 0 означає найнижчий пріоритет, тобто упаковка може бути оброблена без терміновості;
- 1 означає найвищий пріоритет, який вказує на необхідність негайного сортування або доставки.

Зміна пріоритету може бути динамічною в залежності від поточного стану системи або зовнішніх чинників. Наприклад, якщо час на виконання завдання скорочується або якщо одна з робочих зон перевантажена, пріоритет завдання може автоматично підвищитися. Напрям зміни пріоритету залежить від таких факторів:

1. Час на виконання завдання (time-sensitive processing), якщо строк обробки упаковки добігає кінця, пріоритет завдання TP_i може поступово підвищуватися. Це дозволяє системі враховувати час як ключовий фактор і швидше направляти такі упаковки до відповідної робочої зони.

2. Перевантаження робочих зон, якщо система виявляє, що одна з робочих зон або робот-сортувальник є менш завантаженим (Q_k низьке), а інші зони перевантажені, то задачам, що направляються в цю зону, можна тимчасово знизити пріоритет, щоб уникнути небажаного збільшення навантаження на інші зони.

3. Тип продукції або упаковки, деякі види фармацевтичної продукції можуть мати вищий або нижчий пріоритет обробки через їхню вартість, складність транспортування або специфічні умови зберігання. Це також може враховуватись при визначенні пріоритету TP_i .

Таким чином, зміна пріоритету відбувається за таких умов:

- підвищення пріоритету відбувається, якщо упаковка потребує негайного сортування через наближення дедлайну або важливість замовлення;
- зниження пріоритету може здійснюватися у випадку, якщо система виявляє, що інші упаковки потребують більш термінового оброблення, або якщо робочі зони не перевантажені.

Отже, система балансування навантаження вибирає оптимальний варіант сортувальника (робота або робочу зону) на основі мінімізації добутку поточного завантаження Q_k і пріоритету задачі TP_i , що дозволяє досягти рівномірного розподілу навантаження між робочими зонами та забезпечити обробку упаковок відповідно до їхньої важливості.

Для цього визначимо такі характеристики:

$f(LB)_j$ – функція балансування навантаження для входу j ;

TP_i – пріоритет задачі i ;

R_k – робот-сортувальник або/та сортувальний ліфт (P1, P2, P3) з робочою зоною k (Вх. 1; Вх. 2; Вх. 3) та відповідно виходом з них (Вих. 1; Вих. 2; Вих. 3) як представлено на рис. 2.3;

Q_k – поточне завантаження робота або робочої зони k .

Отже, функція балансування навантаження може бути представлена наступним чином:

$$f(LB)_j = R_k, \text{ де } k = \operatorname{argmin}_k (Q \cdot TP_i) \quad (2.34)$$

Тобто відповідно до (2.34) функція вибирає робота або робочу зону k , у якої добуток поточного завантаження Q_k на пріоритет задачі TP_i мінімальний. Це означає, що вибирається той робот або зона, які найкраще збалансують завантаження, враховуючи пріоритет завдань.

Приклад: припустимо, у нас є три входи $j = \{1,2,3\}$ та три роботи $R_k = \{P1, P2, P3\}$, як показано на рис. 2.3, а. Поточне завантаження кожного робота Q_k та пріоритет задач TP_i можуть бути представлені числовими значеннями. Функція ($f(LB)_j$) обере робота R_k , який мінімізує значення $Q_k \cdot TP_i$, що

відповідає найкращому балансуванню навантаження з урахуванням пріоритетів. Таким чином, математичний опис функції балансування навантаження в (2.34) є вибір оптимального робота або робочої зони з урахуванням поточного завантаження і пріоритетів завдань.

Наступним завданням необхідно описати переміщення виробу N_i по робочих зонах кожного робота або ліфта (Вх. 1; Вх. 2; Вх. 3) і відповідно виходом з них (Вих. 1; Вих. 2; Вих. 3). Визначимо в рамках даних досліджень, що рух по робочих зонах (М) являє собою процес прийняття рішень щодо того, які вироби або упаковки направляти в кожну конкретну робочу зону на конвеєрній лінії. Для цього визначимо такі характеристики:

$f(Dr)_i$ – функція руху упаковки;

Z_k – робоча зона (від Вх. 1 до Ви. 1 відповідно);

I_i – тип упаковки (2.30).

Тоді функція руху може бути представлена таким чином:

$$f(Dr)_i = Z_k, \text{ де } k = \operatorname{argmin}_k (\text{відстань } Z_k, I_i) \quad (2.35)$$

Тобто функція вибирає робочу зону Z_k , яка має відстань від типу упаковки I_i мінімальна. Це може означати, що упаковка направляється в ту зону, де вона може бути найкраще оброблена з урахуванням її типу.

Приклад: Припустимо, у нас є три завдання $i = \{1, 2, 3\}$ з різними типами упаковок і три робочі зони $Z_k = \{\text{Зона1}, \text{Зона2}, \text{Зона3}\}$, де Зона 1 = відстань від Вх.1 до Ви.1, як показано на рис. 2.3а. Відстань між кожною зоною та типом упаковки може бути виражена числовими значеннями. Функція вибере зону Z_k , яка мінімізує відстань до типу упаковки, що забезпечить оптимальний рух робочими зонами. Таким чином, математичний опис руху по робочих зонах ($f(Dr)_i$) дозволяє вибирати найкращу зону для обробки упаковки, враховуючи тип цієї упаковки та розподіл робочих зон на конвеєрній лінії.

На останньому етапі необхідно описати процес сортування. Визначимо, що сортування роботами та/або ліфтами (S) є процесом направлення упаковок

у певні робочі зони або до робіт залежно від їх характеристик. Для цього визначимо такі характеристики:

$f(S)_i$ – функція сортування для задачі або упаковки i ;

R_k – робот-сортувальник або/та сортувальний ліфт (P1, P2, P3) з робочою зоною k (Вх. 1; Вх. 2; Вх. 3) і відповідно виходом з них (Вих. 1; Вих. 2; Вих. 3) як представлено на рис. 2.3;

C_i – характеристики задачі або упаковки i .

Тоді функція сортування може бути подана як:

$$f(S)_i = R_k, \text{ де } k = \operatorname{argmin}_k(\text{відстань}(R_k, C_i)) \quad (2.36)$$

Функція вибирає робота R_k або робочу зону, що має мінімальну відстань від характеристик C_i . Це дозволяє направляти задачу ту зону, де вона може бути ефективно оброблена з урахуванням її характеристик.

Приклад: Припустимо, у нас є три задачі $i = \{1, 2, 3\}$ з різними характеристиками C_i та три роботи $R_k = \{P1, P2, P3\}$. Відстань між кожним роботом та характеристиками може бути виражена числовими значеннями. Функція вибере робота R_k , який мінімізує відстань до характеристик, що забезпечить оптимальне сортування. Отже, математичний опис сортування роботами ($f(S)_i$) дозволяє обирати робота або робочу зону з урахуванням характеристик задачі, забезпечуючи ефективне та точне спрямування задач на конвеєрній лінії.

Таким чином, послідовність роботи алгоритму балансування навантаження для кожного виробу та його переміщення через систему сортування може бути представлена у вигляді математичних функцій та умов, що забезпечує оптимальне розподілення навантаження між роботами та/або ліфтами на конвеєрній лінії.

Розробимо загальний алгоритм роботи розробленого методу розподілу упаковок за робочими зонами роботів-сортувальників на фармацевтичній

конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок за обраними робочими зонами. Загальний вид алгоритму представлено рисунку 2.4.

Генерація часу сортування в алгоритмі виконується для моделювання варіативності часу, який потрібен роботам на виконання сортувальних завдань, хоча у вхідних даних і зазначені середні значення швидкості виконання сортування для кожного робота. Ця варіативність пов'язана з тим, що реальний час виконання задачі може змінюватися в залежності від багатьох факторів, таких як: тип упаковки, її вага, розмір, матеріал та інші характеристики.

Як видно з алгоритму на рис. 2.4, швидкість сортування є заданою величиною, але генерується час сортування для кожної окремої упаковки, оскільки на практиці завжди існують відхилення від середніх значень через непередбачені фактори [100]. Це відображає реальні умови роботи конвеєра, де час на виконання завдання роботом може коливатися в межах заданого діапазону (наприклад, ± 5 або 10 секунд). Таким чином, генерація часу сортування дозволяє врахувати ці варіації та наблизити моделювання до реальних умов виробництва, що підвищує точність розрахунків і прогнозів.

Наведемо програмну реалізацію розробленого методу моделювання розподілу упаковок за робочими зонами роботів сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок за обраними робочими зонами на мові Python з використанням бібліотеки `numpy` розробленої в середовищі P2Charm.

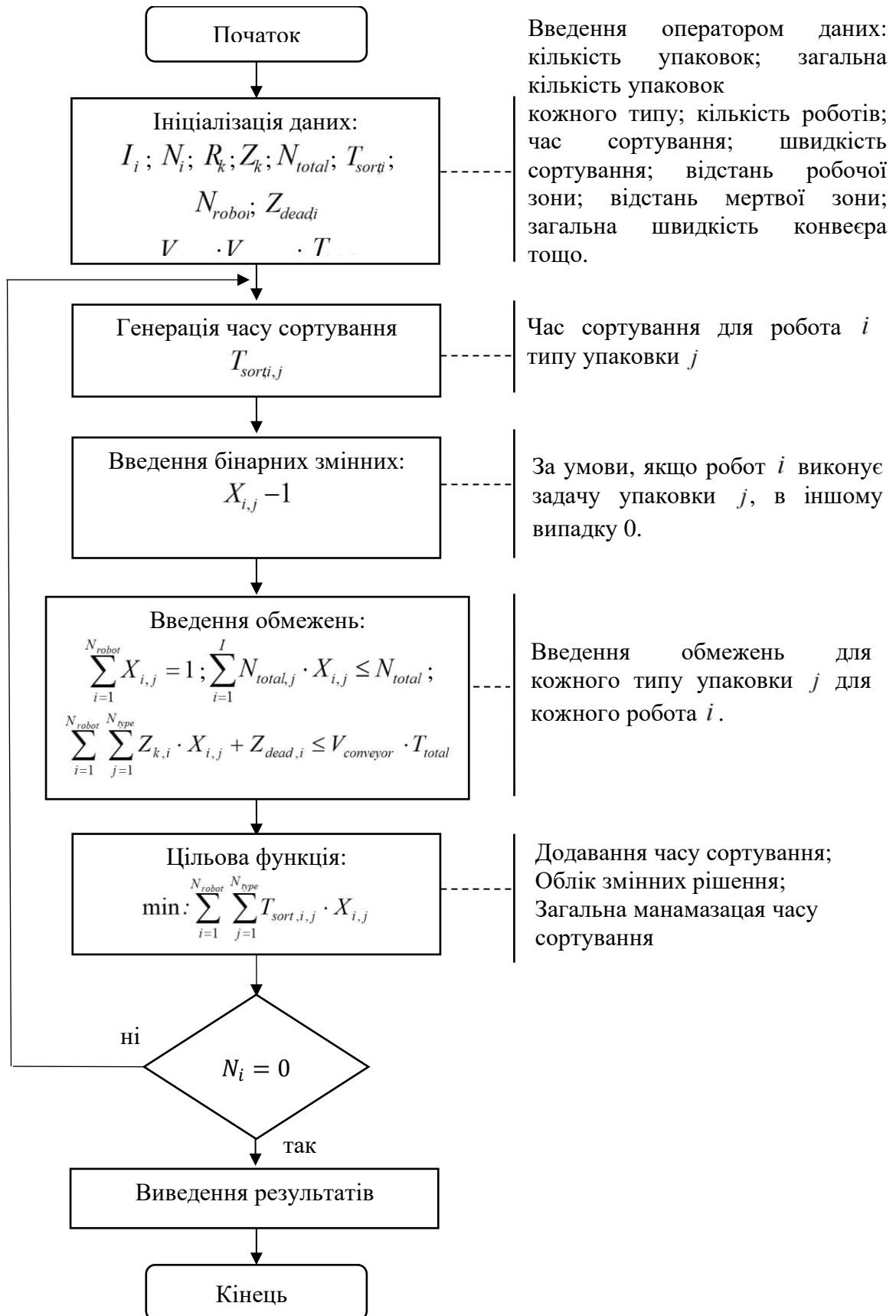


Рисунок 2.4 – Загальний алгоритм роботи розробленого методу розподілу упаковок по робочих зонах роботів сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії

```

import numpy as np

def balancing_algorithm(num_task_types, total_tasks_per_type, num_robots,
sorting_times, robot_speeds, work_distances, deadzone_distance, conveyor_speed,
simulation_time):

    # Створюємо масиви задач і роботів.
    task_types = np.arange(1, num_task_types + 1)
    robots = np.arange(1, num_robots + 1)

    # Ініціалізуємо матрицю часу сортування для кожного робота та типу
задачі.
    matrix = sorting_times.copy()

    # Ініціалізуємо матрицю швидкостей роботів та відстаней робочих та
мертвих зон
    robot_speeds_matrix = np.array([robot_speed for _ in task_types for
robot_speed in robot_speeds])

    work_distances_matrix = np.array([work_distances for _ in robots])
    deadzone_distances_matrix = np.array([deadzone_distance for _ in robots])

    # Запускаємо балансування навантаження.
    start_time = 0

    while start_time < simulation_time:

        # Для кожного типу задачі знаходимо робота з мінімальним
завантаженням та присвоюємо цю задачу йому.
        robot_assignments = np.argmin(np.sum(matrix, axis=1))

        # Обираємо тип задачі, який ще не був повністю оброблений.
        available_task_types = np.where(total_tasks_per_type > 0)[0]
        task_type = np.random.choice(available_task_types)

        # Враховуємо час сортування та переміщення до наступної задачі.
        task_completion_time = matrix[task_type, robot_assignments]
        start_time += task_completion_time

        # Оновлюємо матрицю часу сортування для врахування виконаної
задачі.

```

```

        matrix[task_type, robot_assignments] += task_completion_time *
robot_speeds_matrix[task_type]

        # Оновлюємо загальну кількість задач (упаковок) кожного типу.
        total_tasks_per_type[task_type] -= 1

        # Виводимо результати.
        print(f"Balancing result: Tasks {task_types} were assigned to robots
{robot_assignments}")

        print(f"Sorting time per {simulation_time} seconds: {start_time} seconds")

        # Вводимо дані від оператора.
        num_task_types = int(input("Enter the number of package types (different):
"))

        total_tasks_per_type = np.array([int(input(f"Enter the total number of
packages for the type {i}: ")) for i in range(1, num_task_types + 1)])

        num_robots = int(input("Enter the number of sorting robots: "))

        sorting_times = np.random.uniform(1, 10, size=(num_task_types,
num_robots))

        robot_speeds = np.array([float(input(f"Enter the sorting job speed for the
robot {i} per second: ")) for i in range(1, num_robots + 1)])

        work_distances = float(input("Enter the working area distance for robots in
cm: "))

        deadzone_distance = float(input("Enter the dead zone distance for robots in
cm: "))

        conveyor_speed = float(input("Enter the total conveyor speed in cm/sec: "))
        simulation_time = float(input("Enter the total simulation time in seconds: "))

        # Запускаємо балансування навантаження.
        balancing_algorithm(num_task_types, total_tasks_per_type, num_robots,
sorting_times, robot_speeds, work_distances, deadzone_distance, conveyor_speed,
simulation_time)

```

Проведемо низку досліджень розробленого методу розподілу упаковок за робочими зонами роботів-сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок за обраними робочими зонами та його реалізацію у вигляді програмного модуля за різних вхідних умов [101].

Експеримент 1: Нехай T_{total} – час моделювання дорівнюватиме 3000с, $Z_k = Z_{dead,i}$ – робоча зона роботів становить 50см і стільки ж мертва зона, $V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра 10 см/с; I_i – три типи упаковок за умови $N_i=150$ шт; R_k – 3 роботи-сортувальники та/або ліфти. $V_{sort,i}$ – швидкість виконання задачі сортування для робота, для $R_1 = 30 \pm 5$ с; $R_2=50\pm 10$ с; $R_3= 70 \pm 10$ с. Результати моделювання представлені у табл. 2.4

Для зручності аналізу представимо на рис. 2.5. отримані дані у вигляді комбінованого графіку. Графік (рис. 2.5) показує кількість відсортованих упаковок кожним роботом за різними типами упаковок, а також середній час сортування для кожного виду упаковки.

Таблиця 2.4 – Результати моделювання першого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок за вибраними робочими зонами.

Вид упаковки	Кількість (шт)	Середній час сортування (с)	Відсортовано упаковок (шт)			Не відсортовано упаковок (шт)		
			Робот1	Робот2	Робот3	Робот1	Робот2	Робот3
1	150	29.066	103	0	0	47	0	0
2	150	48.466	0	61	0	0	89	0
3	150	67.800	0	0	44	0	0	106

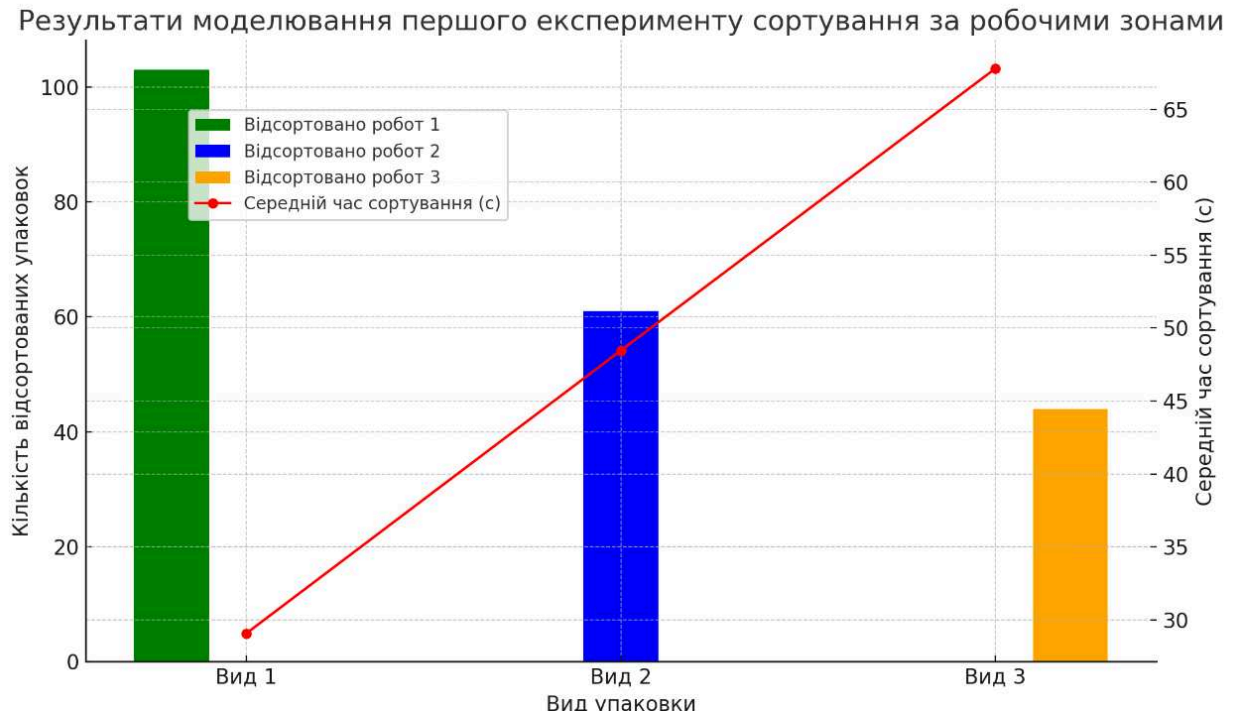


Рисунок 2.5 – Комбінований графік результатів моделювання першого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування.

За отриманими результатами моделювання першого експерименту можна зробити такі висновки:

Різні характеристики роботів:

- Робот 1: сортував 103 упаковки з 150 для виду упаковки 1. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок. Не відсортовано 47 упаковок;
- Робот 2: сортував 61 упаковку з 150 для виду упаковки 2. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок. Не відсортовано 89 упаковок;
- Робот 3: сортував 44 упаковки з 150 для виду упаковки 3. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок. Не відсортовано 106 упаковок.

Ефективність сортування:

- кожен робот має свої характеристики та ефективність у сортуванні різних видів упаковок. Наприклад, Робот 1 найбільш ефективний у сортуванні упаковок виду 1.

Невідсортовані упаковки:

– у табл. 2.4 представлені невідсортовані упаковки, що залишилися для кожного виду. Ця кількість розрахована як різниця між загальною кількістю упаковок та кількістю тих, що вже були відсортовані роботами.

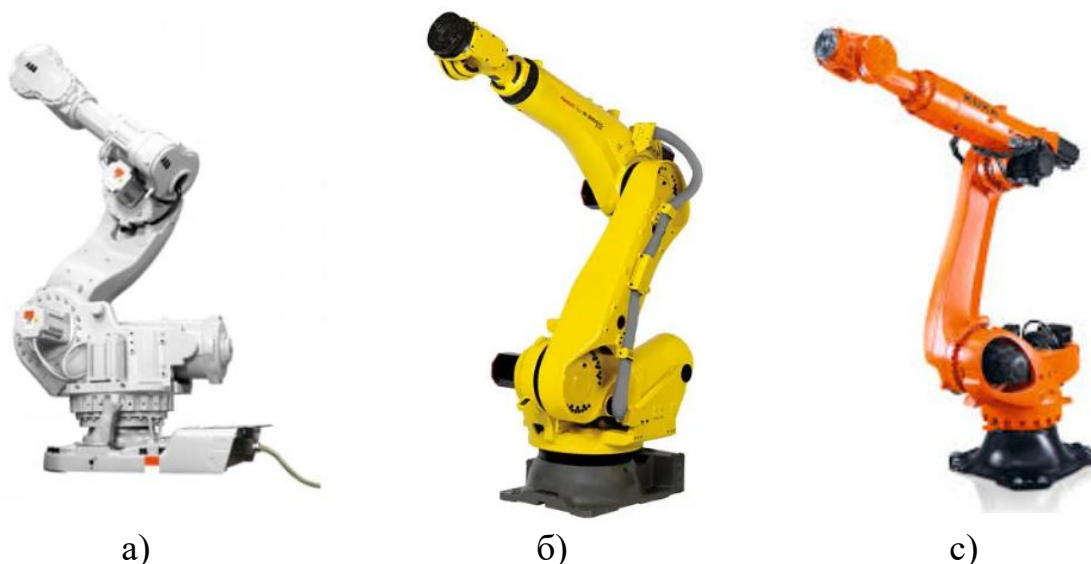
Оптимізація сортування:

– надалі можна розглянути можливість оптимізації процесу сортування, перерозподілу зусиль роботів для більш ефективного використання часу моделювання та збільшення загальної кількості відсортованих упаковок.

Експеримент 2: проведемо моделювання наближене до реального процесу сортування на фармацевтичній конвеєрній лінії. Нехай T_{total} – час моделювання дорівнюватиме 43200с (12 годин); Z_k – робоча зона роботів становить ~ 260 см; $Z_{dead,i}$ – мертва зона ~ 20 см; $V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра 2 м/с; I_i – п'ять типів упаковок за умови $N_1 = 1500$ шт; $N_2 = 2560$; $N_3 = 3200$; $N_4 = 2800$; $N_5 = 3800$; R_k – 5 роботів-сортувальників з технічними характеристиками, зазначеними в табл. 2.5. $V_{sort,i}$ – час виконання завдання сортування для робота для $R_1 = 90 \pm 3$ с; $R_2 = 120 \pm 10$ с; $R_3 = 100 \pm 5$ с; $R_4 = 60 \pm 2$ с; $R_5 = 80 \pm 4$ с.

Проведемо аналіз характеристик та вибір реальних промислових роботів-маніпуляторів, які використовуються для сортування на фармацевтичних конвеєрних лініях [106-110]. Результати аналізу наведено рисунку 2.6.

Порівняння базових технічних характеристик промислових роботів-маніпуляторів: ABB IRB 6700, Fanuc R-2000iC, KUKA KR 210 R2700 наведено у табл. 2.5.



а)

б)

с)

а) модель ABB IRB 6700[103];

б) модель Fanuc R-2000iC[104]

с) модель KUKA KR 210 R2700[105]

Рисунок 2.6 – Вибір промислових роботів-маніпуляторів, які використовуються для сортування на фармацевтичних конвеєрних лініях.

Таблиця 2.5 – Порівняння базових технічних характеристик промислових роботів-маніпуляторів: ABB IRB 6700, Fanuc R-2000iC, KUKA KR 210 R2700

Характеристики	Промислові роботи-маніпулятори		
	ABB IRB 6700	Fanuc R-2000iC	KUKA KR 210 R2700
Навантаження	от 150 кг до 300 кг	от 100 кг до 210 кг	210 кг
Радіус робочої зони	от 2,65 м до 3,2 м	2,650 м до 3,547 м	2,700 м
Швидкість	до 2,2 м/с	до 2,050 м/с	до 2,000 м/с
Вага	~ 900 кг	~ 1,320 кг	~1,180 кг

Результати моделювання експерименту 2 наведено в табл. 2.6

Для зручності аналізу представимо на рис. 2.7 отримані дані у вигляді комбінованого графіку.

Таблиця 2.6 – Результати моделювання другого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок по вибраних робочих зонах.

Вид упаковки	Кількість (шт)	Середній час сортування (с)	Відсортовано упаковок (шт)					Залишилось (шт)
			Робот1	Робот2	Робот3	Робот4	Робот5	
1	1500	90.122	476	0	0	0	0	1024
2	2560	120.406	0	230	0	0	0	2330
3	3200	100.203	0	0	330	0	0	2870
4	2800	60.081	0	0	0	719	0	2081
5	3800	80.162	0	0	0	0	538	3262

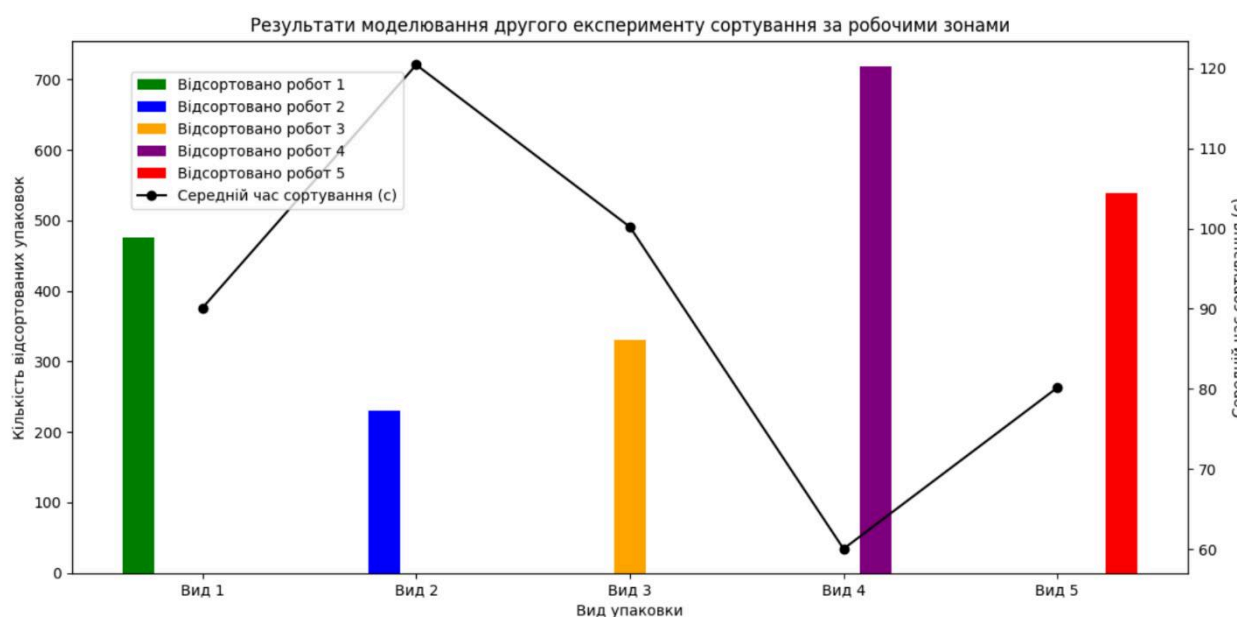


Рисунок 2.7 – Комбінований графік, результати моделювання другого експерименту

За отриманими результатами моделювання другого експерименту можна зробити такі висновки:

Різні характеристики роботів:

- Робот 1: Сортував 476 упаковок з 1500 для виду упаковки 1. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок;
- Робот 2: Сортував 230 упаковок з 2560 для виду упаковки 2. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок;
- Робот 3: Сортував 330 упаковок з 3200 для виду упаковки 3. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок;

– Робот 4: Сортивав 719 упаковок з 2800 для виду упаковки 4. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок;

– Робот 5: Сортивав 538 упаковок з 3800 для виду упаковки 5. Не брав участь у сортуванні інших видів упаковок.

Ефективність сортування:

– у кожного робота є свої особливості у сортуванні різних видів упаковок. Наприклад, Робот 4 виявився найефективнішим у сортуванні упаковок виду 4.

Невідсортовані упаковки:

– у табл. 2.6 представлені невідсортовані упаковки, що залишилися для кожного виду. Ця кількість розрахована як різниця між загальною кількістю упаковок та кількістю тих, що вже були відсортовані роботами.

Оптимізація сортування:

– надалі можна розглянути можливість оптимізації процесу сортування, перерозподілу зусиль робітників для більш ефективного використання часу моделювання та збільшення загальної кількості відсортованих упаковок.

Оцінка точності та достовірності результатів моделювання є важливим етапом для впевненості у якості отриманих даних і правильності зроблених висновків. Точність результатів можна оцінити шляхом розрахунку середньої похибки виконання сортування роботами та розгляду кількості залишкових упаковок, які не вдалося відсортувати під час кожного експерименту. Для кожного робота наведені параметри швидкості виконання сортування містять певний інтервал (наприклад $R_1=90 \pm 3$ с). Це вказує на можливі варіації часу обробки, що можуть впливати на результати.

Для експерименту 1, всі три роботи мають різний середній час виконання завдання сортування: Роботе 1 – 29,066с, Робот 2 – 48,466с, Робот 3 – 67,8с. Можна зробити висновок, що розподіл упаковок по робочих зонах був досить ефективним, оскільки кожен робот працював в межах своїх можливостей і не було значних залишкових упаковок для кожної категорії.

Для експерименту 2, час моделювання та кількість упаковок значно більші:

- середній час сортування для кожного робота варіюється в межах, зазначених у моделі (наприклад, 90.122 с для робота R_1);
- роботи не змогли обробити всю кількість упаковок через обмежений час сортування та високу кількість об'єктів, які необхідно відсортувати.

Точність результатів моделювання також залежить від розподілу упаковок по робочих зонах та швидкості конвеєра. Якщо швидкість конвеєра була занадто високою, частина упаковок могла бути пропущена або залишитися необробленою.

Достовірність результатів підтверджується через повторюваність експериментів та аналіз варіацій у швидкості роботи роботів та конвеєра. Кожен експеримент може бути повторений кілька разів для збору даних про відхилення в сортуванні упаковок. Зокрема, рекомендується провести кілька прогонів моделі з однаковими початковими умовами, щоб оцінити, наскільки результати залишаються стабільними.

Для першого експерименту кількість прогонів може бути 10-20, враховуючи, що процес триває відносно короткий час (3000 с). Для другого експерименту через більший обсяг даних та тривалість моделювання (43200 с), може бути достатньо 5-10 прогонів для оцінки достовірності.

Моделювання можна завершити, якщо виконуються такі умови:

- досягнуто достатньої стабільності результатів після певної кількості прогонів (середнє значення часу сортування упаковок та кількість невідсортованих упаковок не змінюються більше ніж на 5%);
- досягнуто часового ліміту для процесу (наприклад, $T_{total} = 43200$ с для експерименту 2);
- немає більше упаковок, які потребують сортування (наприклад, залишок упаковок дорівнює нулю або знаходиться у допустимих межах).

Отже, для досягнення точної та достовірної моделі сортування в рамках даних досліджень проведено достатню кількість прогонів, проаналізоване відхилення та забезпечено стабільність моделі на основі кількох запусків.

Як можна бачити з результатів проведених експериментів умови моделювання змінюються для того, щоб дослідити роботу системи сортування в різних реальних виробничих сценаріях. Наприклад, експеримент 1 змодельований для умов із меншою кількістю упаковок (по 150 шт.) та меншою швидкістю конвеєра (10 см/с), що відповідає короткому часом моделювання (3000 с). Це тестування роботи системи в умовах малого навантаження. Експеримент 2 описує умови більш інтенсивного виробництва з великою кількістю упаковок (до 3800 шт.) та швидкістю конвеєра 2 м/с, що моделює довготривалий процес (12 годин).

Різні умови дозволяють оцінити поведінку та ефективність сортувальної системи в умовах змінного навантаження та різних виробничих масштабів. Це дає можливість отримати ширший спектр результатів і краще розуміти, як система працюватиме в різних сценаріях.

Як можна бачити, запропоноване рішення має обмеження з точки сортування, кожен робот сортує один вид упаковки, дане рішення оптимально при сортуванні обмеженого виду упаковок, що є не оптимальним рішенням, як показують отримані дані. Виходячи з цього необхідно провести дослідження та розробити математичне подання сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах, тобто кожен робот може сортувати будь-який вид упаковки, з погляду автора це забезпечити балансування робочого навантаження між роботами чи робочими зонами залежно від поточних умов та вимог. Приклад принципу роботи наведено рисунку 2.3, б. На базі розробленого вище методу розподілу упаковок за вибраними робочими зонами для опису математичних моделей сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах, тобто кожен робот може сортувати будь-який вид упаковки, пропонується використовувати такі описи визначення змінних, які перетинаються з вище розробленим методом. Це дасть можливість

спростити читання математичних моделей. Визначимо такі змінні для опису моделей:

Z_k – розмір робочої зони робота (від Вх. 1 до Ви. 1 відповідно) вираз 2.35;

$Z_{dead,i}$ – розмір мертвої зони робота (відстань між Вих.1 та Вх.2) як показано на рис. 2.3.

$V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра;

I_i – кількість різних типів упаковок виду i ;

N_i – кількість упаковок кожного виду i , які потрібно відсортувати;

R_k – кількість роботів, що беруть участь у процесі сортування;

$V_{sort,k}$ – час виконання сортування для однієї упаковки роботом k ;

T_{total} – загальний час моделювання роботи системи сортування;

$R_k = W_{areas}$ – кількість робочих зон дорівнює кількості роботів сортувальників.

На першому етапі виконаємо математичний опис динамічної адаптації параметрів, це дозволить врахувати такі фактори:

- мінливість навантаження, обсяг та типи упаковок можуть змінюватися з часом. Динамічна адаптація дозволяє системі ефективно реагувати на зміни у завантаженні, запобігаючи перевантаженню або недостатньому використанню ресурсів;

- оптимізація продуктивності шляхом адаптації параметрів, зокрема розмір робочої зони робота і швидкість сортування, тож можна оптимізувати продуктивність системи. Наприклад, збільшення розміру робочої зони або швидкості сортування у періоди підвищеного завантаження може прискорити процес сортування;

- енергозбереження, що дає можливість адаптації параметрів. Наприклад, зниження швидкості сортування в періоди низького завантаження може заощадити енергію та продовжити термін служби обладнання;

- керування роботами через можливість системи сортування може включати кілька роботів, і їх стан (зайнятий або вільний) може змінюватися.

Динамічна адаптація допомагає ефективно розподіляти завдання між вільними роботами, мінімізуючи простої та максимізуючи використання ресурсів;

– адаптація до дефектів обладнання - параметри можуть адаптуватися у відповідь на дефекти або відмови обладнання. Наприклад, якщо у робота виникли проблеми з робочою зоною, її розмір може бути адаптований для обходу проблемної ділянки.

В цілому динамічна адаптація параметрів дозволяє системі бути гнучкою та ефективною в різних умовах, що важливо для оптимізації роботи конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції.

В рамках даних досліджень припустимо, що розмір робочої зони робота Z_k змінюється в залежності від поточного завантаження та стану системи, тоді:

$$Z_k^i = f_{Z_k}(C_{down}, S_{state}) \quad (2.37)$$

де C_{down} – поточне завантаження робочої зони робота k ;

S_{state} – поточний стан системи на даний момент T_{total} .

Аналогічно представимо динамічну адаптацію часу виконання сортування ($V_{sort,k}$) для однієї упаковки роботом k , наступним чином:

$$V_{sort,k}^i = f_{sort,k}(V_{conveyor}, I_i, N_i, C_{down}, S_{state}) \quad (2.38)$$

де $V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра;

I_i – кількість різних типів упаковок виду i ;

N_i – кількість упаковок кожного виду i , які потрібно відсортувати;

C_{down} – поточне завантаження робочої зони робота k ;

S_{state} – поточний стан системи на даний момент T_{total} .

Визначення вільних та зайнятих зон (W_{areas}) шляхом введення бінарних змінних, що позначають стан роботів на поточному часовому кроці:

$$B_{R_k}^i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \textit{робот } k \text{ зайнятий} \\ 0, \text{ якщо } \textit{робот } k \text{ вільний} \end{cases} \quad (2.39)$$

де $B_{R_k}^i$ – стан робота R_k на поточному часовому кроці моделювання.

Розподіл упаковок визначається, скільки упаковок кожного типу знаходиться у робочих зонах роботів:

$$N_{i,k}^{(i)} = f_{N_{i,k}}(I_i, Z_k, C_{down}, S_{state}) \quad (2.40)$$

де I_i – кількість різних типів упаковок виду i ;

Z_k – розмір робочої зони робота;

C_{down} – поточне завантаження робочої зони робота k ;

S_{state} – поточний стан системи на даний момент T_{total} .

Визначення поточного навантаження можна отримати із загальної кількості упаковок кожного типу в системі:

$$N_i^{(i)} = \sum_{k=1}^R N_{i,k}^{(i)} \quad (2.41)$$

Виходячи з (2.37), (2.38) і (2.40) функції адаптації f_{Z_k} , $f_{sort,k}$, $f_{N_{i,k}}$ можуть представляти собою лінійні або нелінійні залежності від різних параметрів, таких як поточне завантаження, розміри робочих зон, швидкість конвеєра та інші, підбиратися з урахуванням технічних характеристик конвеєра та роботів-сортувальників і можуть значно відрізнятися. від серій та моделі обраного обладнання.

Також необхідно врахувати при процесі моделювання те що:

– процес адаптації виконується на кожному часовому кроці протягом обмеженого часу моделювання;

– на основі адаптованих параметрів приймаються рішення про те, як розподілити упаковки по робочих зонах роботів з урахуванням їхнього стану (зайнятий чи вільний).

Опишемо математичну модель розподілу упаковок по робочих зонах:

$$D(i, j) = \frac{N_{i,j}}{\sum_k R_k \cdot Z_k} \quad (2.42)$$

де $D(i, j)$ – доля упаковок типу j на часовому кроці i ;

$\sum_k R_k \cdot Z_k$ – загальна робоча зона, яка доступна для сортування на поточному часовому кроці;

i – індекс часового кроку;

j – індекс типу упаковки;

k – індекс робота;

$N_{i,j}$ – кількість упаковок типу j на часовому кроці i ;

R_k – кількість роботів у робочій зоні k ;

Z_k – розмір робочої зони робота.

Запропонована модель (2.42) дає можливість:

– визначити частку упаковок кожного типу на поточному тимчасовому кроці. Частка розраховується як відношення кількості упаковок даного типу до загальної робочої зони, яка доступна для сортування;

– розподіл упаковок здійснюється пропорційно доступному простору в кожній робочій зоні. Це враховує різну кількість та розміри робочих зон роботів;

– результати даного етапу використовуються для подальшого прийняття рішень, наприклад, в алгоритмі балансування навантаження, щоб визначити, які роботи будуть обробляти якісь типи упаковок.

Для розрахунку часу сортування на конвеєрі пропонується наступна математична модель:

$$T_{sort_{i,j}} = \frac{N_{i,j}}{\sum_k R_k} \cdot \frac{1}{V_{sort_k}} + \frac{Z_k}{V_{conveyor}} \quad (2.43)$$

де $T_{sort_{i,j}}$ – час сортування для упаковок типу j на часовому кроці i ;

$\frac{N_{i,j}}{\sum_k R_k} \cdot \frac{1}{V_{sort_k}}$ – час, витрачений на сортування упаковок роботами;

$\frac{Z_k}{V_{conveyor}}$ – час, витрачений на переміщення упаковок конвеєром;

i – індекс часового кроку;

j – індекс типу упаковки;

k – індекс робота;

$N_{i,j}$ – кількість упаковок типу j на часовому кроці i ;

R_k – кількість роботів у робочій зоні k ;

Z_k – розмір робочої зони робота.

$V_{sort,k}$ – час виконання завдання сортування для робота k ;

$V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра.

Математична модель (2.43) враховує, що час сортування залежить від кількості упаковок, кількості роботів та їхньої швидкості сортування, а також швидкості конвеєра. Перша частина формули є сумарним часом, витраченим на сортування упаковок роботами. Цей час залежить від кількості упаковок даного типу та загальної кількості роботів у системі. Друга частина формули враховує час, необхідний переміщення упаковок по конвеєру. Тут використовується загальна довжина робочих зон роботів (Z_k) та швидкість конвеєра ($V_{conveyor}$), що дає змогу враховувати час сортування для кожного типу упаковок на кожному часовому кроці.

Для розрахунку часу знаходження упаковки в мертвій зоні пропонується використовувати наступну математичну модель:

$$T_{dead_k} = \frac{Z_{dead_k}}{V_{conveyor}} \quad (2.44)$$

де T_{dead_k} – час, витрачений на переміщення упаковок у мертвій зоні;

i – індекс часового кроку;

k – індекс робота;

$V_{conveyor}$ – швидкість конвеєра;

Z_{dead_k} – розмір мертвої зони для робота k .

T_{dead_k} – час, який робот k витрачає на переміщення упаковок у мертвій зоні. Важливо враховувати мертву зону, щоб уникнути конфліктів між роботами та забезпечити безперебійну роботу системи сортування.

Оновлення кількості вільних роботів та робочих зон пропонується наступна математична модель:

$$F_k^{(i)} = R_k - N_k^{(i)} \quad (2.45)$$

де $F_k^{(i)}$ – кількість вільних роботів у робочій зоні k на часовому кроці i ;

$N_k^{(i)}$ – кількість упаковок, оброблених роботом k на часовому кроці i ;

i – індекс часового кроку;

j – індекс типу упаковки;

k – індекс робота;

$N_{i,j}$ – кількість упаковок типу j на часовому кроці i .

Математичний вираз (2.45) передбачає, що кількість вільних роботів у робочій зоні дорівнює різниці між загальною кількістю роботів та кількістю упаковок, які вони обробили. На кожному етапі відбувається оновлення кількості вільних роботів, враховуючи, скільки упаковок було оброблено кожним роботом. $F_k^{(i)}$ важливий подальшого розподілу упаковок між вільними роботами.

Для проведення моделювання процесу роботи сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах, тобто кожен робот може сортувати будь-який вид упаковки, необхідно забезпечити рівномірний час рівномірний розподіл часу моделювання між часовими кроками, як показано в математичному виразі (2.46).

$$t_i = \frac{i \cdot T_{total}}{N_{step}} \quad (2.46)$$

де t_i – поточний час на часовому кроці i ;

i – індекс часового кроку;

T_{total} – загальний час моделювання;

$\frac{T_{total}}{N_{step}}$ – інтервал часу між кроками.

Вираз (2.46) передбачає рівномірне розподілення часу моделювання між часовими кроками. Розраховується час на кожному часовому кроці, щоб відобразити зміну часу в процесі моделювання. Це важливо для управління часом виконання операцій та забезпечення послідовного моделювання

Запропонована математична модель дає можливість враховувати розміри робочих та мертвих зон, швидкість конвеєра, кількість роботів, кількість типів упаковок та їх кількість, а також швидкість виконання завдання сортування при розподілі упаковок по всіх робочих зонах (рис. 2.3, б).

Проведемо перевірку на адекватність розроблених математичних моделей і розробимо загальний алгоритм сортування упаковок за умов розподілу по всіх робочих зонах на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування. Загальний вид алгоритму представлено на рис. 2.8.

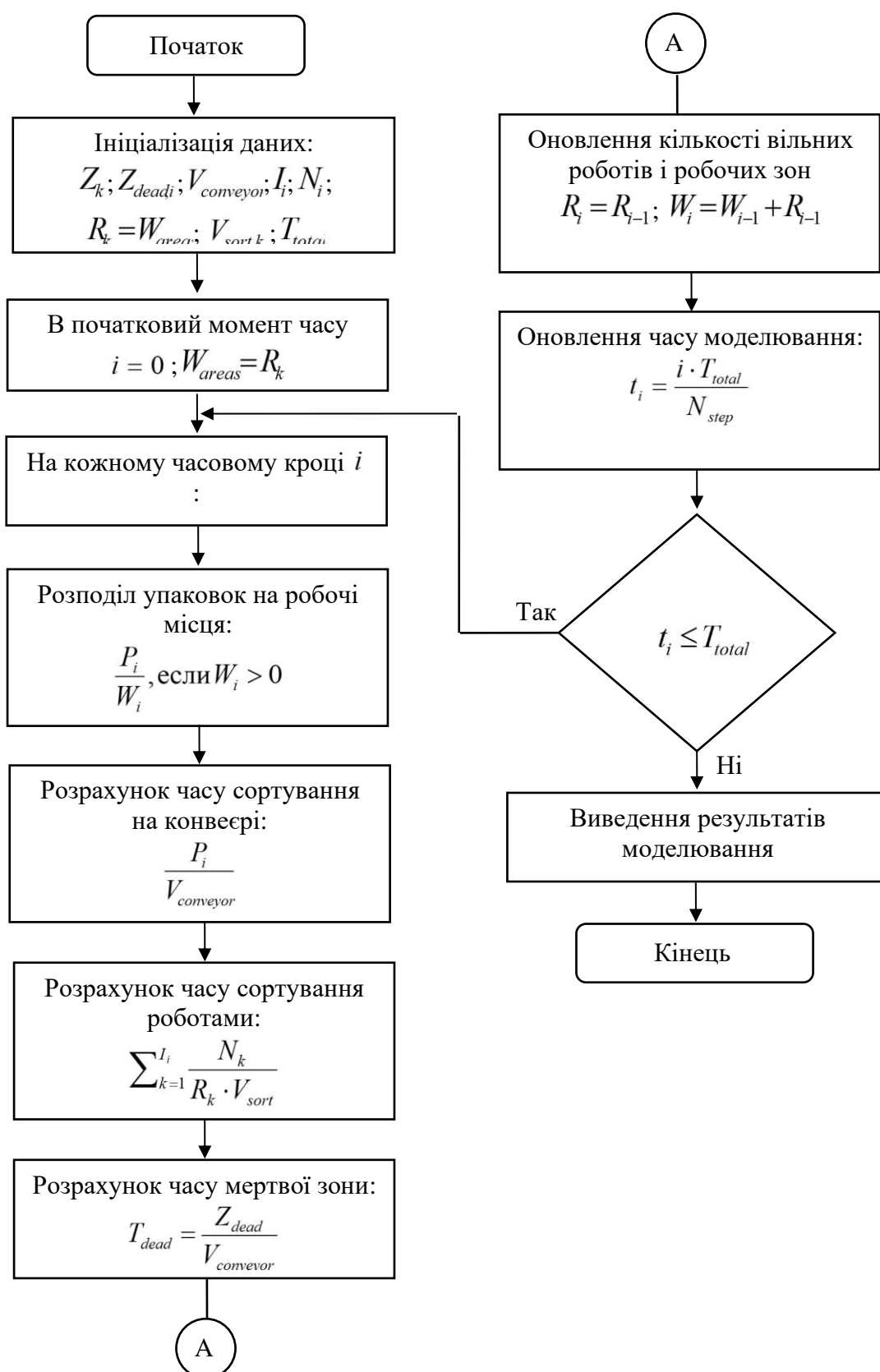


Рисунок 2.8 – Загальний алгоритм сортування упаковок за умов розподілу по всіх робочих зонах на фармацевтичній конвеєрній лінії

Розробимо програмну реалізацію розробленого методу моделювання розподілу упаковок по робочих зонах роботів сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах мовою Python у середовищі PyCharm 2022.2.3.

```
class Robot:
    def __init__(self, speed, work_zone, dead_zone):
        self.speed = speed
        self.work_zone = work_zone
        self.dead_zone = dead_zone
        self.busy = False

    def load_balancing(num_robots, conveyor_speed, total_time, num_types,
num_per_type, sorting_time, work_zone, dead_zone):
        robots = [Robot(speed=10, work_zone=work_zone,
dead_zone=dead_zone) for _ in range(num_robots)]

        total_items = num_types * num_per_type
        items_per_robot = total_items // num_robots
        for time_step in range(total_time):
            for robot in robots:
                if not robot.busy:
                    robot.busy = True

            # Додаткові етапи алгоритму АТС
            # ...
            # Оновлення стану роботів та розрахунок часу сортування
            for robot in robots:
                if robot.busy:
                    sorting_speed = min(robot.speed, conveyor_speed)
                    time_taken = sorting_time / sorting_speed
                    robot.busy = False
```

```

# Розрахунок результатів балансування
result_balancing = [robot.busy for robot in robots]

# Розрахунок кількості відсортованих та упаковок, що залишилися.
sorted_items = sum(result_balancing) * items_per_robot
remaining_items = total_items - sorted_items

# Виведення результатів
print("Результат балансування:", result_balancing)
    print("Час сортування за вказаний час моделювання:", total_time)
    print("Відсортовано упаковок:", sorted_items)
    print("Залишилось упаковок:", remaining_items)

# Введення даних оператором
num_robots = int(input("Введіть кількість роботів: "))
conveyor_speed = float(input("Введіть швидкість конвеєра (см/с): "))
total_time = int(input("Введіть загальний час моделювання (с): "))
num_types = int(input("Введіть кількість типів упаковок: "))
num_per_type = int(input("Введіть кількість упаковок кожного типу: "))
sorting_time = float(input("Введіть час сортування для роботів (с): "))
work_zone = float(input("Введіть розмір робочої зони робота (см): "))
dead_zone = float(input("Введіть розмір мертвої зони робота (см): "))

# Приклад використання
load_balancing(num_robots, conveyor_speed, total_time, num_types,
num_per_type, sorting_time, work_zone, dead_zone).

```

Проведемо низку досліджень розробленого методу розподілу упаковок по робочих зонах роботів-сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах. Для зручності аналізу візьмемо вихідні дані експерименту 1 та експерименту 2, які були проведені при дослідженнях розробленого методу розподілу упаковок по робочих зонах роботів-сортувальників на фармацевтичній конвеєрній лінії сортування за принципом розподілу упаковок за обраними робочими зонами та проведемо порівняння отриманих результатів. Результати моделювання

вище запропонованого методу сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах наведені в табл. 2.7 і на рис. 2.9.

Таблиця 2.7 – Результати моделювання першого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах.

Вид упаковки	Кількість (шт)	Середній час сортування (с)	Відсортовано упаковок (шт)			Не відсортовано (шт)
			Робот1	Робот2	Робот3	
1	150	27.196	75	37	10	28
2	150	46.236	27	26	48	49
3	150	65.110	12	31	22	85

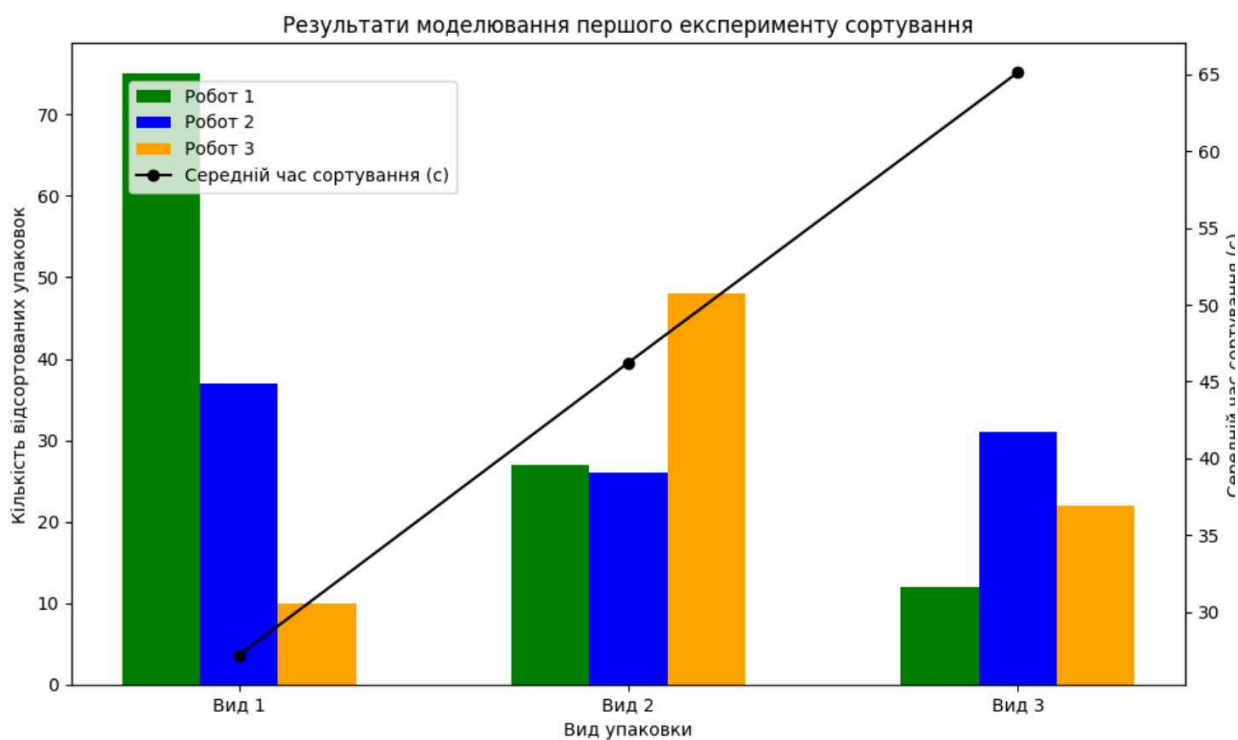


Рисунок 2.9 – Комбінований графік результатів моделювання першого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах

На комбінованому графіку стовпчастий графік показує кількість відсортованих упаковок для кожного робота, а лінія – середній час сортування для кожного виду упаковки.

Проведемо аналіз та порівняємо отримані результати другого експерименту моделювання роботи конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції. Результати моделювання другого експерименту сортування типів упаковок за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах роботам наведено в табл. 2.8. та у вигляді комбінованого графіку на рис. 2.10

Таблиця 2.8 – Результати моделювання другого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок за всіма робочими зонами роботам.

Вид упаковки	Кількість (шт)	Середній час сортування (с)	Відсортовано упаковок (шт)					Не відсортовано (шт)
			Робот 1	Робот 2	Робот 3	Робот 4	Робот 5	
1	1500	90.122	209	160	180	106	194	651
2	2560	120.406	123	167	80	95	68	2027
3	3200	100.203	154	178	94	105	86	2583
4	2800	60.081	256	195	201	145	212	1791
5	3800	80.162	224	173	212	132	232	2827

Це дає можливість зробити наступні висновки: за результатами моделювання другого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок по всіх робочих зонах можна підсумувати, що розроблений алгоритм загалом працює ефективно. Він дозволяє розподілити навантаження між роботами, що забезпечує продуктивність сортування на високому рівні. Однак, зростання кількості упаковок впливає на продуктивність, оскільки в деяких категоріях залишається значна кількість невідсортованих об'єктів.

Так, для першої категорії (1500 шт.) всі роботи успішно впоралися зі своєю частиною задачі, проте певна кількість упаковок (651 шт.) залишилася невідсортованою. Це свідчить про те, що існує потенціал для вдосконалення обладнання або збільшення його потужності, щоб підвищити загальну продуктивність.

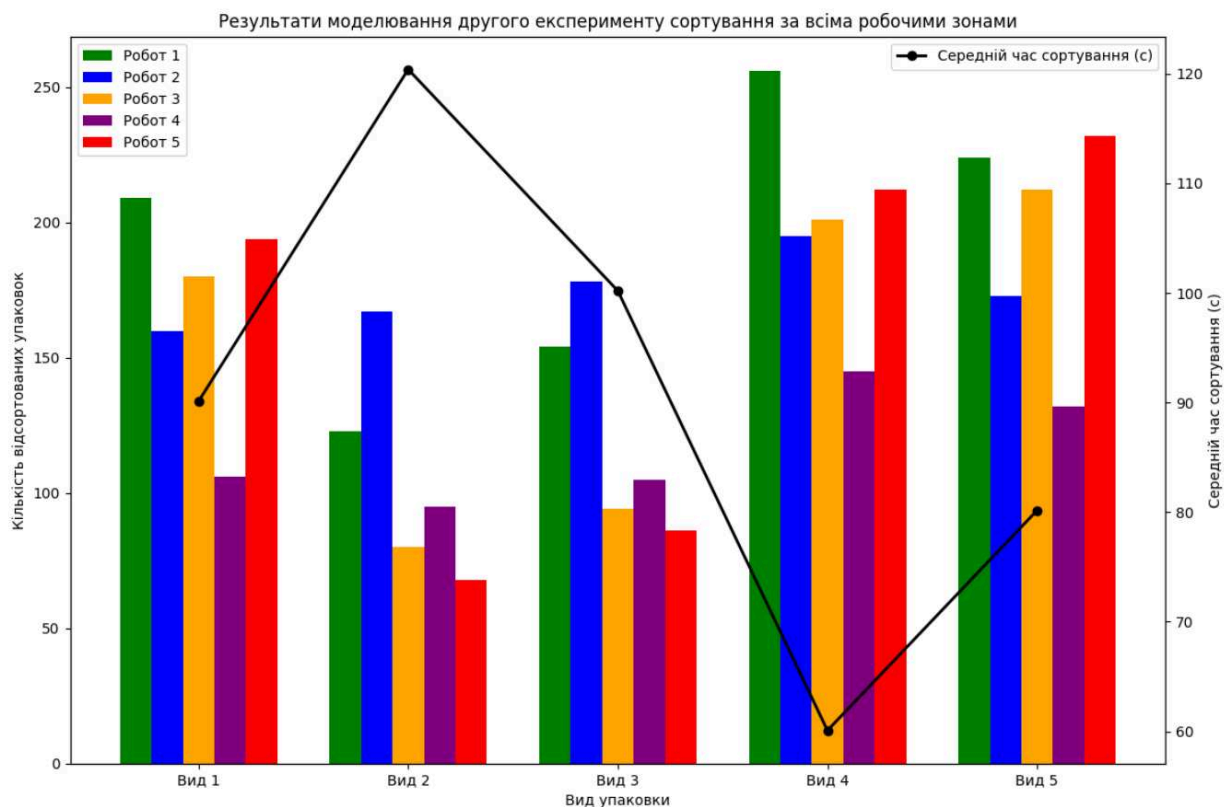


Рисунок 2.10 – Комбінований графік отриманих результатів моделювання другого експерименту роботи конвеєрних ліній сортування за принципом розподілу упаковок за всіма робочими зонами роботам.

У другій категорії (2560 шт.) продуктивність деяких роботів була меншою, що також можна пов'язати з характеристиками обладнання, а не з недоліками алгоритму. Модернізація обладнання могла б сприяти більш рівномірному розподілу навантаження.

У третьої та четвертої категоріях (3200 і 2800 шт.) алгоритм показує гарні результати, хоча кількість невідсортованих упаковок залишилася значною. Це вказує на те, що вдосконалення технічної частини системи (швидкості роботів або їх пропускної здатності) допоможе досягти ще кращих показників.

П'ята категорія (3800 шт.) продемонструвала, що навіть за складних умов алгоритм ефективно розподіляє задачі між роботами. Проте зменшення кількості невідсортованих упаковок можна досягти за рахунок підвищення

потужності або модернізації обладнання, що дозволить роботам працювати швидше та ефективніше.

Отже, алгоритм добре адаптується до різних умов, але для подальшого підвищення продуктивності сортування рекомендується модернізувати або доповнити обладнання для більшої ефективності на великих партіях упаковок

2.4 Висновки за розділом 2

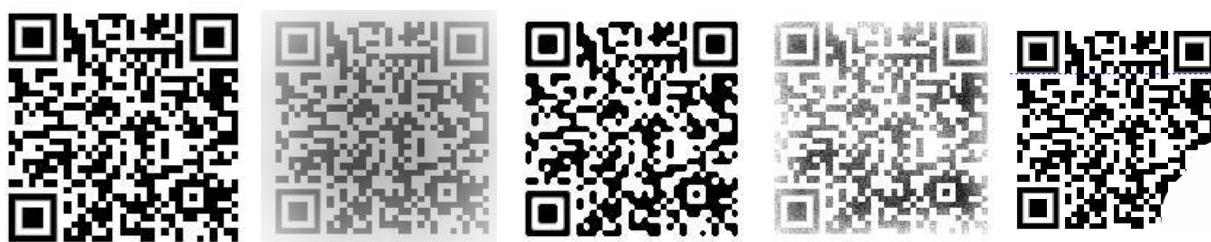
У другому розділі дисертації висвітлюється розробка моделей розпізнавання типів упаковок і методу адаптивності навантаження на конвеєрну лінію для фармацевтичної продукції. Основна увага була приділена постановці задачі параметричного моделювання формалізації упаковки, що дозволило створити нову параметричну модель, яка на відміну від існуючих підходів, забезпечує швидке і точне розпізнавання типів упаковок на основі базових ознак. Це значно скорочує час, необхідний для ідентифікації та сортування фармацевтичної продукції на конвеєрній лінії. Додатково було розроблено метод адаптивного навантаження, який дозволяє рівномірно розподіляти упаковки по робочих зонах роботів-сортувальників. Такий підхід вдосконалює процес сортування, забезпечуючи більш ефективний перерозподіл навантаження між роботами, що в свою чергу покращує загальну продуктивність і скорочує час обробки продукції. Ці нові підходи забезпечують підвищення ефективності конвеєрних ліній і дозволяють досягти оптимізації сортувального процесу, роблячи систему більш гнучкою та адаптивною до змін у типах продукції та інтенсивності роботи. Наукова новизна цього розділу полягає в розробці параметричної моделі формалізації упаковок і методу адаптивного розподілу навантаження, що значно підвищує ефективність процесу сортування фармацевтичної продукції.

Основні результати другого розділу опубліковано у роботах [65, 99-102].
Список джерел, які використано у другому розділі, наведено у переліку джерел
посилань [62-64, 66-98, 103-105]

З ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ УПАКОВОК НА КОНВЕЄРНІЙ ЛІНІЇ СОРТУВАННЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

3.1 Удосконалення методу нормалізації кадру зображення QR-коду

Враховуючи те, що розроблена система буде використовуватися для сортування упаковок в рамках конвеєрної лінії, виникає значна вірогідність того, що отримане зображення QR-кодів може бути пошкоджено в процесі транспортування [106-111]. Приклад пошкоджень QR-кодів наведено на рис. 3.1.



а)

б)

в)

г)

г)

а) тестовий зразок; б) розмиття; в) засвітленість; г) потертості; г) фізичне
ушкодження

Рисунок 3.1 – Приклад кадрів зображення QR-кодів на конвеєрних лініях
для сортування упаковок

Всі ці пошкодження погано впливають на час ідентифікації, а в багатьох випадках, якщо система не може ідентифікувати упаковку, то вона потрапляє у відстійник, а потім у ручному режимі розпізнається та сортується, внаслідок цього пропонується використовувати наступну послідовність дій: аналіз вхідного зображення кадру QR-коду на основі динамічних моделей, далі використання контрастозбільшуючого фільтра (щоб виправити «розмиття»,

«засвітленість», «потертості» (рис. 3.1, б – рис. 3.1, г) та вдосконалити метод фільтрації кадра.

В роботі [112] розглядаються проблеми побудови вирішальної функції при зменшенні відношення сигнал/шум поточного зображення. В даній статті використовується набір інформативних ознак для виділення об'єкта прив'язки, а саме контрастності, яскравості а також область його розташування. В той же час для обробки зображень в роботі [113] використовується фільтр Калмана. Запропоноване в згаданій роботі рішення буде частково використане при розробці програмного забезпечення для роботи із QR-кодом.

Хай, в рамках цього дослідження для аналізу зображення кадра QR-коду будемо використовувати двовимірні дискретні лінійні та нелінійні моделі, що дають можливість описати динаміку поверхні отриманого зображення у просторі. Тоді лінійну модель можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bv(t), v(t) \approx N(0, Q); x(0) = x_0 \\ y(t) = Cx(t) + w(t), w(t) \approx N(0, R) \end{cases} \quad (3.1)$$

де $y(t)$ – вектор зображення;

$x(t)$ – вектор стану динамічної моделі;

A – матриця-оператор моделі;

B – матриця фільтра ковзного середнього;

C – матриця функціонального перетворення при вимірюванні значень елементів зображення кадра QR-коду;

$v(t), w(t)$ – вектор гаусового центрованого шуму з кореляційними функціями Q та R ;

x_0 – вектор початкових або граничних значень.

Матриця – оператор (A) (3.1) буде мати наступну структуру:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_M & -a_{M-1} & -a_1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

де M – порядок моделі, a_i – параметри оператора моделі.

З огляду на те, що дослідження проводиться з зображенням кадра QR-коду, проведемо спрощення характеристик векторів шуму, зробивши таке припущення (3.3):

$$Q(t) = R(t) = \sigma^2 \delta(t) \quad (3.3)$$

де σ^2 – дисперсія гаусового шуму, $\delta(t)$ – дельта-функція.

У (3.1) можливо представити як авторегресію з ARMA (AutoRegression and Moving Average), тоді модель прийме наступний вигляд:

$$u_{i,j} = - \sum_{m,n=0(m,n \neq 0)}^{P,Q} a_{m,n} u_{i-m,j-n} - \sum_{m,n=0}^{L,M} b_{m,n} w_{i-m,j-n} \quad (3.4)$$

де $u_{i,j}$ – відліки сигналу зображення кадру QR-коду;

$a_{m,n}$ – коефіцієнти лінійного передбачення (ЛП) ;

$w_{i-m,j-n}$ – відліки білого шуму;

P, Q – параметри, що задають порядок по координатах (OX, OY) ;

$b_{m,n}, L, M$ – коефіцієнти та порядок складової ковзного середнього.

Як можна бачити, отримана модель (3.4), складеться з моделі AR (Autoregression), що дає можливість описати динамічні властивості сигналу та класифікації використовують авто регресійну складову та МА (moving average – ковзне середнє) похибки як допоміжну, щоб охарактеризувати модель AR. Виходимо з того, що для ідентифікації упаковки, використовується кадр, який в процесі роботи конвертується з RGB у Crayscale. Це дає можливість спростити модель (3.4), до наступного вигляду:

$$u_{i,j} = - \sum_{m,n=0(m,n \neq 0)}^{P,Q} a_{m,n} u_{i-m,j-n} + \varepsilon_{i,j} \quad (3.5)$$

де $\varepsilon_{i,j}$ – відліки похибки з дисперсією σ^2 .

Виходячи, з отриманої моделі (3.5) коефіцієнт, можна знайти за допомогою метода найменших квадратів, що дозволяє коригувати чутливість отриманої моделі до незначних флуктуацій (рис. 3.1 б-г). Це досягається завдяки тому, що параметри моделі не залежать від зсуву базового фрагмента кадру QR-коду відносно координат, у яких визначено кадр. Для забезпечення інваріантності моделі (3.5) до зсуву координат та її адекватності, вона повинна виконувати функції апроксимації і екстраполяції даних сигналу, що надходить із зображення, отриманого з кадру QR-коду. Якщо модель виявляється неадекватною, у межах цього дослідження пропонується використовувати дискретну нелінійну модель у вигляді ряду Вольтера [114].

Як критерій адекватності моделі можна використовувати співвідношення між потужністю сигналу зображення кадру QR-коду та величиною похибки та може бути визначено через Signal to Noise Ratio (SNR) [115]

$$SNR = 20 \lg \frac{P(u)}{\sigma_\tau^2} \quad (3.6)$$

де $P(u)$ – потужність сигналу базового фрагменту зображення кадру QR-коду;

σ_τ^2 – дисперсія шуму похибки.

Наступним кроком для обробки отриманого кадру QR-коду, пропонується використовувати медіанний фільтр (МФ). Це дає можливість послідовно обробити кожен точку отриманого кадру, в результаті чого утворюється послідовність оцінок. Медіанна фільтрація передбачає

використання апертури фільтра, яка зазвичай має центральну симетрію, при цьому центр апертури знаходиться в точці фільтрації [116]. В даному випадку пропонується використовувати МФ, що має квадратну апертуру зі стороною рівною 3. Якщо МФ знижує локальну контрастність зображення кадру QR-коду, пропонується використовувати контрастозбільшувачий фільтр. Ядром контрастозбільшувачого фільтра має значення, більше 1 у точці (0,0), при загальній сумі всіх значень рівній 1.

Приклади, контрастозбільшувачого фільтра з ядром, що задається матрицею M_n^{contr} , представлено в (3.7).

$$M_1^{cont} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad M_2^{cont} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Як можна бачити з (3.7), ефект підвищення контрасту досягається за рахунок того, що фільтр підкреслює різницю між інтенсивностями сусідніх пікселів, видаляючи ці інтенсивності одну від одної.

Останнім кроком роботи з отриманим кадром зображення QR-коду, пропонується очищення зображення кадра від різних видів шумів на базі удосконаленого метода фільтрації зображення Susan [117, 118]. Зазвичай, при використанні методу Susan розглядається група пікселів 5*5 елементів, центральний піксель цієї матриці є тим, що підлягає аналізу. В рамках даних досліджень для автоматичного методу обробки кадрів пропонується QR-код зменшити до 3*3. Використання матриці пікселів 3*3 кілька уповільнює роботу системи, але показує більш точні результати, необхідні для зчитування та декодування інформації з QR-коду.

У ході перевірки розраховується відхилення яскравості пікселя від середньої яскравості. Якщо фільтр «вирішує», що такого пікселя бути не повинно, його «гучне» значення замінюється новим, розрахованим на основі оточуючих пікселів. Критерій визначення шуму в даному методі полягає в розгляді n пікселів, що потрапили в матрицю пікселів.

Суму відхилень яскравості пікселів від середнього значення можливо розрахувати як:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta_i \quad (3.8)$$

де $\Delta_i = |\bar{b} - b_i|$;

b_i – значення пікселя i ;

$\bar{b}$ – середнє значення яскравості, яка розраховується згідно виразу:

$$\bar{b} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{b_i}{n} \quad (3.9)$$

Визначається відносний вклад відхилення Δ_k пікселя, що підлягає аналізу в значенні s

$$P_k = \frac{\Delta_k}{S} \quad (3.10)$$

де k – номер пікселя, що підлягає аналізу.

Вірогідно, що $\sum_{i=0}^{n-1} p_i = 1$.

Якщо в розглянутому форматі зображення кадра спостерігається рівномірний розподіл яскравості пікселів, то і значення p_i буде несильно відмінним від $1/n$. Яскравість шумового пікселя значно відрізняється від середньої яскравості оточуючих його пікселів. Величина Δ_k такого пікселя більш ніж у інших пікселів, а це значить, що P_k буде перевищувати $1/n$. Це і є критерієм шумового пікселя, якщо $P_k > 1/n$, значить піксель k є шумовим.

Після виявлення шумового пікселя необхідно вирішити, що з ним робити, тут є два варіанти:

– замінити шумовий піксель середнім значенням $\bar{b}$;

– замінити шумовий піксель середнім значеннями, порахувавши з урахуваннями значень всіх пікселів за винятком шумового.

В даному випадку пропонується, замінити шумовий піксель середнім значеннями, порахувавши з урахуваннями значень всіх пікселів, що не задовольняють критерію відбору шуму.

3.2 Удосконалення методу кодування інформації

Для удосконалення методу кодування інформації у QR-кодах пропонується використовувати – «оператор введення надмірності» (часто також використовується термін «маска»). У QR-кодах це відноситься до одного з методів корекції помилок, який дозволяє покращити надійність читання коду у разі його пошкодження або спотворення .

Коли QR-код створюється, в нього вбудовується додаткова інформація, яка може бути використана для відновлення даних у разі їхньої часткової втрати. Цей процес називається корекцією помилок, і він здійснюється з використанням оператора введення надмірності.

Коротко кажучи, оператор введення надмірності додає "надлишкові" біти інформації до основних даних QR-коду. Якщо код частково пошкоджено або спотворено, ці додаткові біти можуть бути використані для відновлення втрачених даних. Різні рівні корекції помилок надають різну кількість надлишкових біт, що впливає здатність коду справлятися з ушкодженнями.

У контексті створення QR-коду зазвичай є опції для вибору рівня корекції помилок в залежності від очікуваного рівня пошкоджень, з якими може зіткнутися код. Високий рівень корекції помилок може бути корисним, наприклад, при розміщенні QR-коду на поверхні, яка може зазнавати стирання або інших пошкоджень.

Виходячи з цього в рамках даних досліджень позначимо оператор надмірності ($\mathfrak{Z}$) і пропонуємо реалізувати як деяку процедуру масштабування бінарного зображення QR-коду в певну кількість разів методом найближчого

сусіда (k). Метод "найближчого сусіда" (білінійна інтерполяція) використовується для обчислення значення нового пікселя на основі навколишніх пікселів [119]. Це дозволяє згладити переходи між пікселями та зберегти деталі зображення при зміні розміру. У контексті QR-коду це може бути важливим, оскільки збереження чіткості та читання коду при різних розмірах може бути критичним. Переваги використання методу "найближчого сусіда" в рамках даних досліджень дає можливість при масштабуванні:

- збереження чіткості та читабельності інформації. Метод «найближчого сусіда» забезпечує згладжування і збереження деталей зображення, що особливо корисно для QR-коду, де важлива чітка структура, що читається, особливо щодо конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції;

- мінімізація спотворень. Цей метод допомагає зменшити спотворення та втрату інформації при зміні розмірів зображення;

- читання QR-коду. При збереженні чіткості та читання коду навіть при зміні розміру QR-коду, при деякому розміщенні упаковки на конвеєрній лінії [120].

Внаслідок чого оператор надмірності ($\mathfrak{Z}$) можна формалізувати як:

$$d^{(x,y)}(i,j) = d_o(x,y) \quad (3.11)$$

де d_o – зображення QR-коду;

d – блочно-збільшене зображення;

(x,y) – координати пікселів у QR-коді;

(i,j) – координати пікселів у межах кожного блоку за умов що $(i,j) = 0..k-1$.

Оператор рандомної перестановки даних (θ) пропонується реалізувати у вигляді наступного виразу за допомогою використання перестановки s , яка заснована на поліном-генераторі на базі арифметики з поліномами в полях Галуа.

$$\theta^{(x',y')} = d(x',y')(s) \quad (3.12)$$

де θ – блок рандомного зображення;
 (x', y') – нумеровані пікселі після перестановки
 s – поліном-генератор.

Поліном-генератор (s) можна подати у вигляді:

$$s = (a^1 - x) \cdot (a^2 - x) \cdot \dots \cdot (a^M - x) \quad (3.13)$$

де a – примітивний член поля;
 M – кількість надлишкових символів у QR-коді.

Варто зауважити, що для визначення кількості надлишкових символів у QR-коді в рамках даних досліджень вважатимемо достатнім, у вигляді перемноження біноми виду $(a^n - x)$ у необхідній та достатній кількості з урахуванням правил перемноження поліномів.

Приклад: для кадрування інформації у QR-коді, будемо використовувати 4 надлишкові символи, тоді на базі виразу (3.13) поліном-генератор (s) набуде наступного вигляду:

$$(2^1 - x) \cdot (2^2 - x) \cdot (2^3 - x) \cdot (2^4 - x) \quad (3.14)$$

Як можна бачити з (3.14) цей вираз можна ідентифікувати з полем Галуа з характеристикою 2. У цьому випадку це дозволяє замінити знак $-$ на $+$, звести в ступінь і провести перемноження за правилами Галуа GF [256] породжувальний поліном, який представлений у виразі (3.5).

$$\begin{aligned} (2 + x) \cdot (4 + x) \cdot (8 + x) \cdot (16 + x) = \\ = 116 + 231x + 216x^2 + 30x + x^4 \end{aligned} \quad (3.15)$$

З виразу (3.15) можемо помітити, що корінням отриманого полінома є ступінь примітивного члена, як: 2, 4, 8, 16. При цьому варто помітити, якщо взяти який-небудь інший поліном, і помножити його на x^4 , де 4 – кількість надлишкових символів, то в результаті вийти такий же поліном, з доповненням вигляді нулів перед першими 4 молодшими ступенями. Тепер візьмемо і отриманий результат з доповненням розділимо на поліном-генератор, і додати залишок від поділу до нашого полінома з 4 нулями, його корінням також будуть числа 2, 4, 8, 16.

Звідси можна зробити висновок, що для кодування будь-якої інформації з можливістю відновлення при пошкодженні, необхідно закодувати повідомлення довжиною (m), додавши до нього 4 надлишкові символи, які дають можливість скоригувати 2 помилки або 4 описки.

В рамках даних досліджень і в контексті Ріда-Соломона кодів термін "помилка" зазвичай відноситься до невірної біту або символу в даних, що передаються при скануванні QR-коду. Якщо, наприклад, у процесі сканування повідомлення сталося спотворення одного або кількох бітів через перешкоди або інші чинники, це вважається помилкою. Термін «помилка» зазвичай відноситься до не виправлених помилок, тоді як «похибка» може включати в себе як виправлені, так і не виправлені помилки.

Для зручності подальшої роботи, в рамках даної роботи, введемо наступні скорочення через незручність громіздкості подання поліномів і за відсутності необхідності для подальших досліджень повністю представляти повний математичний запис полінома (3.15) пропонується надалі використовувати тільки коефіцієнт полінома, а його ступінь x визначати із стану цих коефіцієнтів. Отже поліном-генератор з виразу (3.15) можна представити у вигляді:

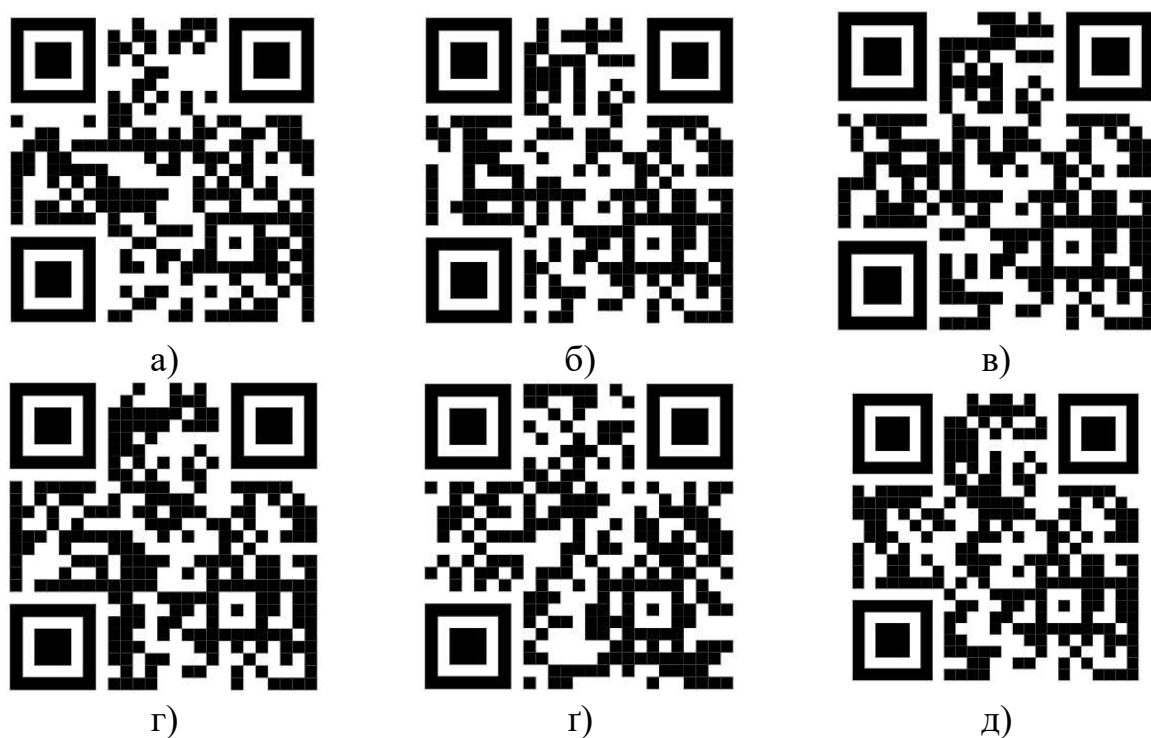
$$\{116, 231, 216, 30, 1\} \quad (3.16)$$

Враховуючи, що ми працюємо із зображенням отриманих з QR-кодів, то вираз (3.16) представимо без дужок і конвертуємо в шістнадцяткову систему обчислень (Hex), то поліном-генератор (3.16) набуде вигляду:

$$74\ E7\ D8\ 1E\ 01 \quad (3.17)$$

Враховуючи запропонований запис (3.7), варто зауважити що в шістнадцятковому записі необхідно враховувати запис коефіцієнтів, які дорівнюють нулю, тобто нехай поліном матиме вигляд $0x^0 + 0x^1 + 0x^2 + 0x^3 + 10x^4$, отже у відповідності до (3.16) – (3.17) даний поліном буде представлений в шістнадцятковому записі як 00 00 00 00 0A.

Згенеруємо набір тестових QR-кодів (рис. 3.1) з наступною інформацією «Test object No. 1» і т.д.



a) Test object No. 1; б) Test object No. 2; в) Test object No. 3; г) Test object No. 4; г) Test object No. 5; д) Test object No. 6.

Рисунок 3.2 – Тестові QR-коди

Щоб надати інформацію «Test object No. 1» зашифрованого в QR-кодi (рис. 3.2, а) у поліномінальній формі відповідно до запропонованого у (3.17) вигляду шістнадцяткового запису, вона матиме наступний вигляд:

$$54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6f\ 62\ 6a\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4e\ 6f\ 2e\ 20\ 31 \quad (3.18)$$

Щоб створити код Ріда-Соломона з 4 надмірними символами, необхідно зрушити поліном (3.18) праворуч, що відповідає його еквівалентному множенню на x^4 . Виходячи з цього (3.18) набуде наступного вигляду:

$$00\ 00\ 00\ 00\ 54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6f\ 62\ 6a\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4e\ 6f\ 2e\ 20\ 31 \quad (3.19)$$

Наступною дією проведемо розподіл отриманого полінома (3.19) на поліном-генератор (3.17), і отриманий залишок запишемо замість 00, що буде еквівалентно операції додавання. Отриманий результат наведено у (3.20).

$$DB\ 22\ 58\ 5C\ 54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6f\ 62\ 6a\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4e\ 6f\ 2e\ 20\ 31 \quad (3.20)$$

Тобто у виразі (3.20) отримано код Ріда-Соломона з 4 надмірними символами для інформації «Test object No. 1» QR-коду представленого на рис. 3.2. QR-код з отриманим кодом Ріда-Соломона з 4 надмірними символами, представлений на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – QR-код у вигляді коду Ріда-Соломона з 4 надмірними символами, який містить текст «Test object No. 1»

Варто зауважити низку обмежень при роботі з удосконаленим методом ідентифікації та розпізнавання заснований на коді Ріда-Соломона.

1. Порядок запису ступеня при поданні повідомлень у поліномі має значення, тобто:

$$\begin{aligned} 121x^4 + 145x^3 + 223x^2 + 21x^1 + 1x^0 &\neq \\ &\neq 121x^0 + 145x^1 + 223x^2 + 21x^3 + 1x^4 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Отже необхідно при використанні вдосконаленого методу, спочатку визначитися з порядком, так як при перетворенні повідомлень у поліном, порядок має значення. Тому з'являється друге обмеження.

2. Додавання надлишкових символів (3.19): вони підставляються саме в молодшому ступені при кодуванні, від вибору порядку ступенів при поданні повідомлення залежить положення надлишкових символів – на початку або наприкінці закодованого повідомлення.

3. Поліном-генератор має чіткий запис ступеня, тобто поліном починатися не з першого ступеня $(a^1 - x) \cdot (a^2 - x) \cdot \dots \cdot (a^M - x)$, а з нульового: $(a^0 - x) \cdot (a^1 - x) \cdot \dots \cdot (a^{M-1} - x)$ - нееквівалентні записи одного й того ж, наступні обчислення відрізнятимуться залежно від реалізованого вибору.

Укрупнений алгоритм кодування інформації QR-код з допомогою поліном-генератора вигляді коду Ріда-Соломона представлений рисунку 3.4.

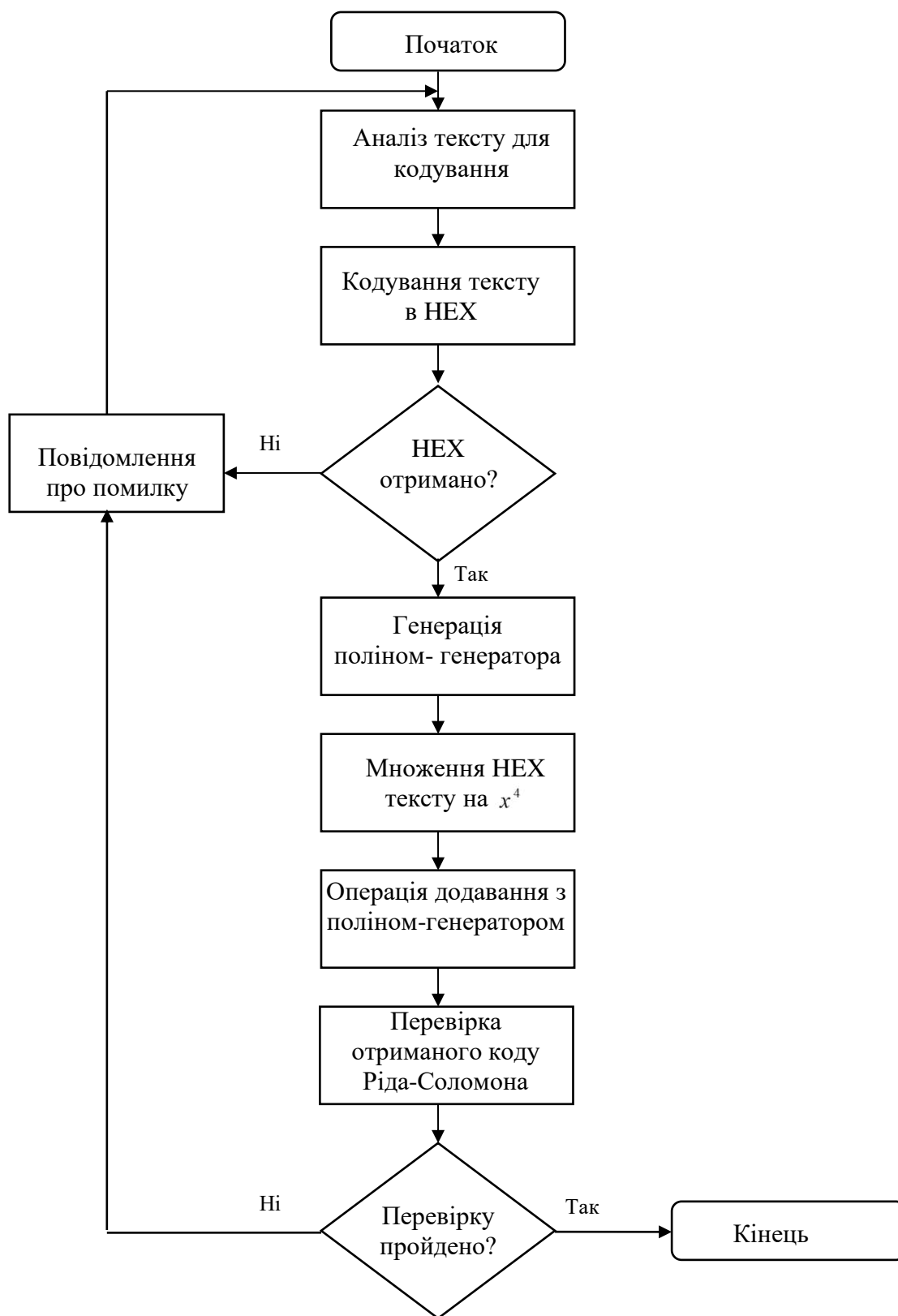


Рисунок 3.4 – Укрупнений алгоритм кодування інформації QR-код за допомогою поліном – генератора у вигляді коду Ріда-Соломона

3.3 Метод розкодування інформації з виправленням «помилки» та «описки»

Для розкодування інформації зашифрованої в QR-код за допомогою полінома-генератора у вигляді коду Ріда-Соломона необхідно знати:

- кількість надлишкових символів;
- зчитати значення полінома при заданому x .

Для виправлення помилок і описки використовуються різні способи. Науковці у [121] використовують нейронну мережу для виправлення шумів на зображенні. Вони використовують згорткову нейронну мережу з рекурентною структурою для «очищення» вихідного зображення. Але для вирішення нашої задачі це виявляється недоцільним. Нам необхідно обчислити поліном прийнятого повідомлення в QR-коді з надмірними символами при x , який відповідає ступеням примітивного члена. Тобто це ті числа, які були використані при створенні полінома-генератора s (3.13):

$$a^1, a^2, \dots, a^M \quad (3.22)$$

де M – кількість надлишкових символів;

a – примітивний член.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що за відсутності помилок, всі обчислення дорівнюватимуть нулю.

Доказ: Якщо закодована інформація у вигляді тесту «Test object No. 1» (3.20) з 4 надмірними символами, у вигляді полінома в шістнадцятковому подана наступним чином:

$$DB\ 22\ 58\ 5C\ 54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6F\ 62\ 6A\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4E\ 6F\ 2E\ 20\ 31 \quad (3.23)$$

То якщо обчислити цей поліном при x рівному 2, 4, 8, 16, то вийдуть значення: 0, 0, 0, 0, адже тут повідомлення точно в такому ж вигляді, в якому воно і було закодовано.

Але в рамках даних досліджень розглянемо окремі випадки коли синдром не дорівнює 0. Дамо визначення «синдром» – у контексті кодів виправлення помилок, таких як коди Ріда-Соломона – це вектор, який вказує на наявність помилок і може використовуватися для їх виявлення та корекції. Якщо синдром не дорівнює нулю, це означає, що у повідомленні сталася помилка. Для перевірки правильності міркувань внесемо до закодованого повідомлення:

DB 22 58 5C 44 4F 4E 27 54 20 50 41 4E 49 43 (3.24)

помилкові дані, тобто свідомо помилимося 4 рази, стільки, скільки в цьому випадку надлишкових символів. Для цього поміняємо в 3.24 останні 4 цифри на цифру 41(A), оскільки позиції помилок зчитуються зліва на право починаючи з нуля, звідси закодоване повідомлення 3.14 набуде наступного вигляду:

DB 22 58 5C 44 4F 4E 27 54 20 41 41 41 41 41 (3.25)

Для зручності роботи у рамках даних досліджень пропонується використовувати шістнадцяткову нумерацію, оскільки це робить процес відстеження та позначення позицій байтів більш компактним та зручним. Замість використання довгих двійкових біт послідовностей, можна подати позиції помилок у більш короткій і зручній для сприйняття формі, що полегшує роботу з даними. Запишемо вирази (3.24) та (3.25) з використанням шістнадцяткової системи нумерації:

00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E (3.26)

DB 22 58 5C 44 4F 4E 27 54 20 50 41 4E 49 43

DB 22 58 5C 44 4F 4E 27 54 20 41 41 41 41 41

З виразу (3.26) видно, що позиції помилок, в даному випадку буде:

0A 0C 0D 0E.

Для відновлення повідомлення у вихідне, необхідно використовувати взяття формальної похідної від полінома за допомогою операцій з поліномами в полях Галуа, тобто формальна похідна від полінома в полі Галуа – це операція, яка подібна до звичайної операції взяття похідної для поліномів, але застосовується в кінцевому полі Галуа. Поле Галуа – це кінцеве поле, в якому арифметичні операції виконуються за модулем простого числа. Нехай F_q – кінцеве поле Галуа з q елементами, і нехай $f(x)$ – поліном з коефіцієнтами з F_q . Тоді формальна похідна полінома $f(x)$ в полі Галуа позначається як $f'(x)$ визначається наступним чином:

$$f'(x) = \sum_{i=1}^n i \cdot a_i \cdot x^{i-1} \quad (3.27)$$

де n – ступінь полінома $f(x)$

a_i – коефіцієнт полінома.

По суті, формальна похідна відображає ступені змінної x та відповідні коефіцієнти полінома помножені на відповідні ступеня, зменшені на 1. Варто врахувати, що в полі Галуа (типу GF [256]) відсутні дробові числа, а, отже, неможливо визначити похідну як відношення нескінченно малих величин, як це робиться в аналізі дійсних чисел. Натомість формальна похідна в полі Галуа визначається як операція, що зберігає структуру поля і враховує тільки цілі ступені змінної. Це дозволяє виконувати операції диференціювання в рамках кінцевих полів, де коефіцієнти набувають значення з обмеженого набору

(наприклад, цілі числа за модулем деякого простого числа). Отже формальна похідна – це похідна визначена в контексті алгебри, і її властивості відповідають властивостям кінцевих полів, а не стандартним правилам диференціювання, що застосовуються до дійсних чисел. У цих дослідженнях її обчислення схоже на звичайну похідну, але з деякими особливостями. Тобто якщо при звичайному диференціюванні $(ax^n)' = a \cdot n \cdot x^{(n-1)}$, тоді для формальної похідної в полі Галуа з основою 2 вираз для диференціювання члена виглядатиме наступним чином:

$$(ax^n)' = a \cdot (n \bmod 2) \cdot x^{(n-1)} \quad (3.28)$$

де (ax^n) – позначення формальної похідної полінома ax^n ;

a – коефіцієнт перед змінною x у вихідному поліномі;

x^{n-1} – частина похідної, яка є меншою на 1 ступінь змінної x ;

$\bmod 2$ – це операція взяття залишку від ділення на 2, що характерно для поля Галуа (GF2), У даному контексті це означає, що всі коефіцієнти в поліномі і його похідній приймають значення 0 або 1.

Проведемо спрощення за рахунок обнулення членів з непарними ступенями, в даному випадку отримуємо вираз:

$$f'(x) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot i \cdot x^{i-1} \bmod 2 = \sum_{i=1}^n a_{2i} \cdot (2i) \cdot x^{2i-1} \bmod 2 \quad (3.29)$$

де a_{2i} – коефіцієнти з парними ступенями. Таким чином, формальна похідна прибирає члени з непарними ступенями і множить коефіцієнти на відповідні ступені змінної x .

Наведемо приклад. Нехай задано наступний поліном, який містить зашифрований текст, отриманий з QR-коду:

$$(1x^0 + 45x^1 + 165x^3 + 198x^4 + 223x^5)' \quad (3.30)$$

Застосуємо до (3.30) правило суми для похідних, тобто похідна суми двох поліномів дорівнює сумі їх похідних. Це правило поширюється на всі члени у сумі, отримаємо:

$$0x^{-1} + 45x^0 + 0x^1 + 198x^2 + 0x^3 + 223x^4 \quad (3.31)$$

Конвертуємо у вигляд шістнадцяткового запису, аналогічно (3.18), отримаємо поліном у наступному вигляді:

$$(01\ 2D\ A5\ C6\ 8C\ DF)' = 2D\ 00\ C6\ 00\ DF \quad (3.32)$$

Тепер, коли у нас є формальна похідна, можна переходити до процедури виправлення помилок в отриманому QR-коді. Для цього будемо використовувати два додаткові поліноми:

– поліном-локатор (Locator Polynomial): Цей поліном використовується для знаходження розташування помилок у переданому повідомленні. У його коефіцієнтах міститься інформація про місця, де сталися помилки. Нехай у межах даних досліджень є поліном помилок $E(x)$, який є добутком членів $(x - \alpha)$, де α - місце помилки. Тоді поліном локатор $L(x)$ пов'язаний з поліномом помилок наступним чином:

$$L(x) = (x - \alpha_1)(x - \alpha_2) \dots (x - \alpha_i) \quad (3.33)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ – розташування помилок у переданому повідомленні.

У даному контексті досліджень, для подальшої роботи будемо використовувати подання полінома-локатора у вигляді добутку наступного виду:

$$(1 + x \cdot a^{\alpha_1}) \cdot (1 + x \cdot a^{\alpha_2}) \cdot \dots \cdot (1 + x \cdot a^{\alpha_N}) \quad (3.34)$$

де a – примітивний член;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ – розташування помилок.

Наведемо приклад, нехай у нас є позиція помилок, яка відповідає значенням розташування: 10, 12, 13, 14 і примітивний член $a = 2$, тоді ґрунтуючись на (3.33) поліном-локатор буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} (1 + 2^{10}x) \cdot (1 + 2^{12}x) \cdot (1 + 2^{13}x) \cdot (1 + 2^{14}x) = \\ = (1 + 116x) \cdot (1 + 205x) \cdot (1 + 135x) \cdot (1 + 19x) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Перемножимо поліном-локатор (3.35) для позицій помилок 10, 12, 13, 14, отриманий результат представлений у (3.36):

$$1x^0 + 45x^1 + 165x^2 + 198x^3 + 140x^4 \quad (3.36)$$

Конвертуємо у вигляд шістнадцяткового запису аналогічно (3.18), (3.32), отримаємо поліном у наступному вигляді:

$$01\ 2D\ A5\ C6\ 8C \quad (3.37)$$

– поліном помилок (Error Polynomial): цей поліном містить інформацію про значення помилок у знайдених місцях. Він дозволяє коригувати передане повідомлення в QR-кодi, враховуючи знайдені помилки.

Нехай у нас є поліном локатор $L(x)$ (3.33), який є добутком лінійних множників $(x - \alpha_i)$, тоді поліном помилок $E(x)$ пов'язаний з поліномом-локатором наступним чином:

$$E(x) = (e_t \cdot x^t + e_{t-1} \cdot x^{t-1} + \dots + e_1 \cdot x + e_0) \quad (3.38)$$

де $e_t, e_{t-1}, \dots, e_1, e_0$ – коефіцієнти полінома помилок, що становлять значення помилок у відповідних місцях $\alpha_t, \alpha_{t-1}, \dots, \alpha_1, \alpha_0$.

Варто зауважити, що коефіцієнти e_t можуть бути обчислені в процесі корекції помилок, і вони використовуються для оновлення значень у переданому повідомленні QR-коду відповідно до знайдених помилок.

На базі (3.25) знайдемо поліном помилок для спотвореного повідомлення, DB 22 58 5C 44 4F 4E 27 54 20 41 41 41 41 при значеннях полінома синдромів 72 BD 22 5B. Для цього необхідно отримати добуток полінома синдрому і полінома-локатора, конвертувати його в шістнадцятковий запис аналогічно 3.18, 3.32 і 3.37.

$$(72 \text{ BD } 22 \text{ 5B}) (01 \text{ 2D } \text{A5 } \text{C6 } \text{8C}) = 72 \text{ 4B } 10 \text{ 22 } \text{D9 } \text{C0 } \text{57 } \text{15} \quad (3.39)$$

Для отримання полінома помилок з результату отриманого виразу (3.39) залишаємо кількість молодших членів, що дорівнює кількості надлишкових символів (в даному випадку 4), а старші ступені ігноруємо. Тоді поліном помилки буде такий:

$$72 \text{ 4B } 10 \text{ 22} \quad (3.40)$$

Наступним кроком необхідно розрахувати амплітуду помилок. У контексті дослідження зчитування інформації з QR-кодів на конвертній лінії та застосування кодів Ріда-Соломона, зчитування амплітуд помилок має важливе значення для процесу виправлення помилок та підвищення надійності передавання даних. QR-коди використовуються для зберігання інформації. І при передаванні даних може виникнути їх спотворення через різні фактори, такі як перешкоди, пошкодження даних. Зчитування амплітуд помилок у QR-кодах може використовуватися для:

- виявлення помилок: амплітуди помилок можуть допомогти виявити, де і в яких місцях QR-коду відбулися спотворення або пошкодження. Це важливо визначення того, де потрібно провести процес виправлення помилок;
- виправлення помилок: на основі амплітуд помилок можна застосовувати алгоритми корекції помилок, такі як коди Ріда-Соломона. Амплітуди помилок можуть вказувати на місця, де потрібно зробити корекцію, та допомагають відновити вихідні дані;
- підвищення надійності: зчитування амплітуд помилок дозволяє створювати QR-коди з більш високим ступенем стійкості до спотворень. Це підвищує надійність передачі і покращує читабельність коду за умов несприятливих чинників.

В цілому процес зчитування та обробки амплітуд помилок у QR-кодах з використанням кодів Ріда-Соломона сприяє створенню більш стійких і надійних методів передачі інформації.

Для розрахунку амплітуд помилок пропонується використовувати Алгоритм Форні (Forney Algorithm). Алгоритм Форні застосовується для декодування кодів Ріда-Соломона. Він особливо корисний під час корекції помилок у кодах з використанням просторових кодів, таких як QR-коди. Алгоритм Форні виконує обчислення, спрямовані визначення коефіцієнтів помилок в переданому коді. Загальний вигляд алгоритму Форні представлено рисунку 3.5.

Як можна бачити із загального вигляду алгоритму Форні (рис. 3.4) на етапі отримання вхідних даних, алгоритм приймає такі дані:

- поліном синдрому;
- поліном, у якому члени – позиції помилки;
- кількість надлишкових символів;
- позиції помилок.

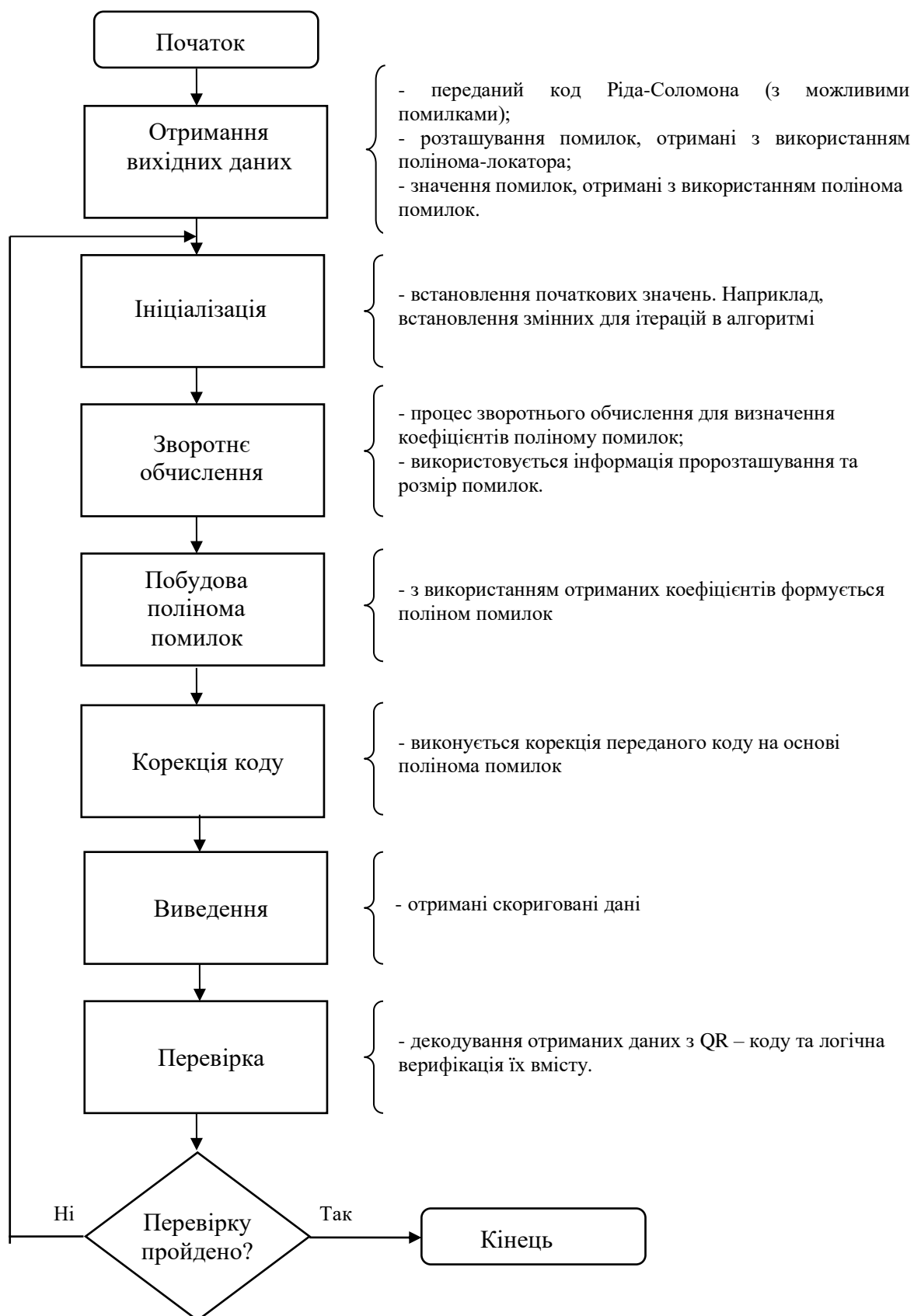


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд алгоритму Форні

Для розрахунку амплітуду помилок на базі алгоритму Форні (рис. 3.5) з використанням кодів Ріда-Соломона напишемо програму мовою Python. Фрагмент реалізації розрахунку амплітуди помилки наведено з коментарями нижче.

```
import numpy as np

def forney_algorithm(syndromes, locator_poly, err_pos,
num_of_err_corr_syms):
    # Ініціалізація змінних
    lambda_vals = np.array([1], dtype='int')
    err_vals = np.array([1], dtype='int')

    for i in range(1, num_of_err_corr_syms + 1):
        # Розрахунок lambda_i
        lambda_i = np.sum(np.multiply(syndromes, err_vals[::-1])) % 2

        # Оновлення lambda_vals
        lambda_vals = np.insert(lambda_vals, 0, lambda_i)

        if i < num_of_err_corr_syms:
            # Оновлення err_vals
            err_vals = np.insert(err_vals, 0, 0)
            for j in range(len(err_pos)):
                err_vals[err_pos[j]] ^= lambda_i * lambda_vals[j]

        # Розрахунок амплітуд помилок
        err_amplitudes = np.multiply(lambda_vals, err_vals)

    return err_amplitudes.tolist()
```

```
# Приклад використання функції
syndromes = [1, 0, 1] # Приклад синдромів
locator_poly = [1, 0, 1] # Приклад полінома-локатора
err_pos = [1, 3] # Приклад позицій помилок
num_of_err_corr_syms = 2 # Кількість надлишкових символів

amplitudes = forney_algorithm(syndromes, locator_poly, err_pos,
num_of_err_corr_syms)
print("Амплітуди помилок:", amplitudes)
```

Бібліотека «numru» використовується для виконання операцій над поліномами та виконання операцій у кінцевому полі GF(2).

Для перевірки розрахунку амплітуди помилок на базі алгоритм Форні (рис. 3.5) та реалізованої програми поставимо такі параметри:

- поліном синдром 72 BD 22 5B (3.24);
- поліном, у якому члени - позиції помилок 0A 0C 0D 0E (3.26);
- кількість символів корекцій помилок – 4.

На виході програма підрахує поліном амплітуди помилки, який у цьому випадку дорівнюватиме:

$$00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 11\ 00\ 0F\ 08\ 02 \quad (3.41)$$

Наступним кроком додамо отримані результат розрахунку амплітуди помилки (3.41) до спотвореного повідомлення (3.25) у відповідності до правил складання поліномів та отримаємо:

$$DB\ 22\ 58\ 5C\ 54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6F\ 62\ 6A\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4E\ 6F\ 2E\ 20\ 31 \quad (3.42)$$

Враховуючи що перші 4 біти, є надмірними, і якщо в них виявилася «друкарська помилка», для алгоритму Форні вони не мають критичного

значення при обчисленнях, тому їх можна відкинути, внаслідок чого ми отримуємо наступний шістнадцятковий код:

$$54\ 65\ 73\ 74\ 20\ 6F\ 62\ 6A\ 65\ 63\ 74\ 20\ 4E\ 6F\ 2E\ 20\ 31 \quad (3.43)$$

Розшифровка отриманого шістнадцяткового коду, видасть повідомлення: «Test object No. 1», що доводить, що запропоновані рішення в рамках даних досліджень адекватні.

Для перевірки розрахуємо можливість виникнення помилки при розшифровці даних з QR-коду. Припустимо в рамках даних досліджень, що відбувається кодування, тексту в QR-коді з 4 символів, 4 надмірними символами, тобто ми отримуємо 8 байт. Так само припустимо можливість помилки при передачі одного символу в QR-коді $\sim 10\%$. Виходячи з цього, в середньому на кожні 10 символів припадає один, який передається як випадкове число в діапазоні від 00 до FF. Підрахуємо можливість помилкової передачі. Розрахунок пропонується проводити так: поліноми, кратні поліном-генератору можна отримати множенням даного генератора на інші поліноми. П'ятизначний поліном у загальному вигляді:

$$P(x) = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (3.44)$$

де $a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ – коефіцієнти поліному.

П'ятизначний кратний поліном можна отримати множенням на константу від 1 до 255. Загальний вигляд п'ятизначного кратного полінома має вигляд:

$$Q(x) = 5a_5x^5 + 5a_4x^4 + 5a_3x^3 + 5a_2x^2 + 5a_1x + 5a_0 \quad (3.45)$$

Дане міркування тотожне для 6-, 7- і 8-значних поліномів, кратних генератору. Нехай ймовірність появи 5, 6, 7 і 8 помилок підряд. Щоб

визначити, чи буде така випадковість послідовностей помилок кратною поліному-генератору, для кожного випадку обчислимо відповідну ймовірність,. Після проведення додавання отримаємо ймовірність помилкової передачі 4 байтів з 4 надлишковими символами. Якщо ймовірність помилки при передачі одного символу становить 10%, то відбудеться помилкова передача, яка не буде виправлена кодом Ріда-Соломона. Проведемо розрахунок, нехай кількість комбінацій k з n :

$$C(n, k) = \frac{n!}{k! [(n - k)!]} \quad (3.46)$$

де $n!$ – добуток усіх позитивних цілих чисел від 1 до n ;

$k!$ – добуток усіх позитивних цілих чисел від 1 до k ;

$(n - k)!$ – добуток усіх позитивних цілих чисел від 1 до $n - k$.

Грунтуючись на (3.36) і формулі Бернуллі, отримаємо опис ймовірності того, що в серії з n незалежних бінарних експериментів (де кожен експеримент може завершитися успіхом із ймовірністю p та невдачею з ймовірністю $(1 - p)$), відбудеться k успіхів.

$$PB(n, k, p) = C(n, k) \cdot p^k \cdot (1 - p)^{(n-k)} \quad (3.47)$$

де $C(n, k)$ – біномінальний коефіцієнт, який представляє собою кількість способів обрати k елементів з множини n елементів.

Тоді кількість можливих результатів поспіль (k) в послідовності довжини (n), можна записати у вигляді:

$$C(n, k) = n - k + 1 \quad (3.48)$$

Виходячи з цього ймовірність появи результату k раз поспіль у n випробуванні при ймовірності події p , ґрунтуючись на 3.47 можна уявити у вигляді:

$$P(n, k, p) = PB(n, k, p) \cdot \frac{S(n, k)}{C(n, k)} \quad (3.49)$$

де $PB(n, k, p) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$ – ймовірність успіху k разів поспіль з n експериментів, відповідно до формули Бернуллі;

$S(n, k)$ – число яке являє собою кількість способів розташувати k успішних результатів у серії з n експериментів, що дорівнює $\binom{n}{k}$ біноміальному коефіцієнту, який визначається в (3.36);

$C(n, k)$ – біноміальний коефіцієнт, який являє собою кількість способів вибрати k елементів із множини n елементів, що дорівнює $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

Вираз (3.49) дає можливість поєднати ймовірність успіху k раз поспіль з урахуванням усіх можливих перестановок успішних результатів серій із n експериментів.

Розрахуємо загальну кількість унікальних комбінацій символів для 5-символьного генератора поліномів, який може починатися на кожній з $N - 5 + 1$ позицій у рядку завдовжки N за виразом:

$$Q5(N) = 255^{(N-5+1)} \quad (3.50)$$

де N – змінна, що представляє загальну кількість символів;

$N - 5 + 1$ – кількість позицій, на яких може починатися 5-символьний генератор поліномів у рядку завдовжки N , тобто $N - 5 + 1$ можливі положення, де ці символи можуть починатися;

$255^{(N-5+1)}$ – загальна кількість унікальних комбінацій символів для $N - 5 + 1$ позицій у 5-символьному генераторі поліномів, що дає можливість враховувати всі комбінації символів у кожній з $N - 5 + 1$ позиції.

Тоді ймовірність появи помилково-безпомилкової послідовності при N випадкових символах підряд для 5-символьного генератора можна описати у вигляді:

$$Pf(N) = \frac{Q5(N)}{256^N} \quad (3.51)$$

де $Q5(N)$ – кількість унікальних комбінацій символів для 5-символьного генератора – полінома у послідовності N , як було визначено в (3.50);

256^N – загальна кількість можливих комбінацій символів для послідовності довжиною N , припускаючи, що кожен з N символів може набувати будь-яке з 256 унікальних значень (байт).

Виходячи з (3.51) можна оцінити ймовірність появи помилково-безпомилкової послідовності при використанні 5-символьного генератора символів у послідовності довжиною N .

Проведемо розрахунок ймовірності появи помилково-негативного тесту на помилку за вище заданих умов. Вираз для розрахунку ймовірності та сам розрахунок представлений у (3.52):

$$Err = \sum_{k=5}^8 (P(8,k,0.1) \cdot Pf(k)) = 7.3679001 \times 10^{-15} \quad (3.52)$$

де $P(8, k, 0.1)$ – ймовірність того, що при проведенні 8 незалежних експериментів з ймовірністю помилки k помилок, що може бути виражено з використанням біномного розподілу як $\binom{8}{k} \cdot (0.1)^k \cdot (0.9)^{8-k}$;

$Pf(k)$ – ймовірність появи помилково-безпомилкової послідовності при використанні 5-символьного генератора в послідовності довжиною k , як було визначено в (3.51);

Err – загальна ймовірність появи помилково-негативного тесту на помилку. Вона виходить додаванням ймовірностей помилок при проведенні 8 експериментів з різною кількістю помилок k , враховуючи ймовірність появи помилково-безпомилкової послідовності для кожного k .

Для розуміння ймовірності появи помилково-негативного тесту на помилку, розрахуємо обсяг інформації, що передається, яка може призвести до такого випадку:

$$\frac{1}{Err} \cdot 4 = 493.760604455 \quad (3.53)$$

де Err – загальна ймовірність появи помилково-негативного тесту на помилку розраховується з виразу (3.52);

$\frac{1}{Err}$ – зворотна ймовірність появи помилково-негативного тесту на помилку. Якщо ймовірність висока, це значення буде малим, і навпаки. Ця зворотна ймовірність служить вагою, яка враховує, як часто помилка може статися;

4 – коефіцієнт, який є кількістю байт (розмір інформації);

1024^4 – кількість байт в терабайті.

Як можна бачити з 3.53, приблизно на 494 Тб інформації виявиться один блок з 4 помилкових символів, які запропоновані алгоритми вважають коректним. Тобто можливість помилки при передачі інформації на основі QR-кодів буде прямувати до 0.

3.4 Моделювання різних типів пошкоджень QR-кодів на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції

Для аналізу та перевірки на адекватність запропонованих методів нормалізації та вдосконаленого методу кодування інформації, а також методу пошуку розкодування інформації з виправленням «помилки» та «описки» проведемо ряд порівняльних експериментів і змодельємо на них різні типи ушкоджень: розмиття, засвітленість, потертість та фізичне ушкодження. Використовуючи метод побудови каналної гістограми QR-коду можна отримати інформацію про розподіл яскравості (інтенсивності) у кожному кольоровому каналі (червоному, зеленому та синьому), що може бути корисним при аналізі змін, таких як розмиття, засвітлення, потертість або фізичне ушкодження, які можуть позначитися такими ефектами:

- розмиття, при розмитті рівні інтенсивності можуть стати більш плавними, і піки в гістограмі можуть стати менш вираженими. Це може знизити контрастність, що може вплинути на читання QR-коду;
- засвітлення, збільшення яскравості зображення, що відобразиться у вищих значеннях інтенсивності на гістограмі. Важливо, щоб значення залишалися в межах допустимих QR-кодів, щоб не втратити інформацію;
- потертість, особливо у певних областях, може призвести до зменшення інтенсивності у відповідних частинах гістограми. Це може створити вузькі піки або яскраві лінії в гістограмі, що може позначитися на читанні;
- фізичне пошкодження, може призвести до артефактів, шумів або аномальних значень у гістограмі, особливо в областях ушкоджень. Такі зміни можуть ускладнити зчитування QR-коду.

Отже, це дозволяє провести аналіз таких аспектів станів дослідженого QR-коду:

- контрастність. Якщо каналні гістограми показують чітко виражені піки та відмінності в інтенсивності, це може вказувати на хорошу контрастність QR-коду, що позитивно впливає на його читання;

- оцінка яскравості. Рівномірна інтенсивність по всіх каналах може свідчити про гарну яскравість зображення, що також може покращити можливість читання QR-коду;
- виявлення нерівномірних областей. Якщо каналні гістограми показують нерівномірні області, це може вказувати на можливі проблеми з освітленням або якістю друку у деяких частинах QR-коду;
- визначення артефактів. Наявність аномальних значень або викидів у каналних гістограмах може вказувати на артефакти або спотворення у зображенні, що може ускладнити зчитування QR-коду;
- оцінка колірної схеми. Канальні гістограми можуть допомогти оцінити колірну гаму зображення. У QR-кодах зазвичай використовується чорно-біла колірна схема, тому варто звернути увагу, щоб вона відповідала очікуванням;
- оцінка якості блоків виправлення помилок. Якщо QR код містить блоки виправлення помилок, каналні гістограми можуть допомогти виявити відмінності в інтенсивності, пов'язані з цими блоками, що може бути корисним при оцінці їх якості [122].

Для цього розробимо програму візуального аналізу розподілу яскравості в кожному кольорі зображення QR-коду за допомогою побудови каналних гістограм мовою Python з використанням бібліотеки Matplotlib і Pillow (PIL). Загальний вид алгоритму побудови каналної гістограми наведено на рис. 3.6.

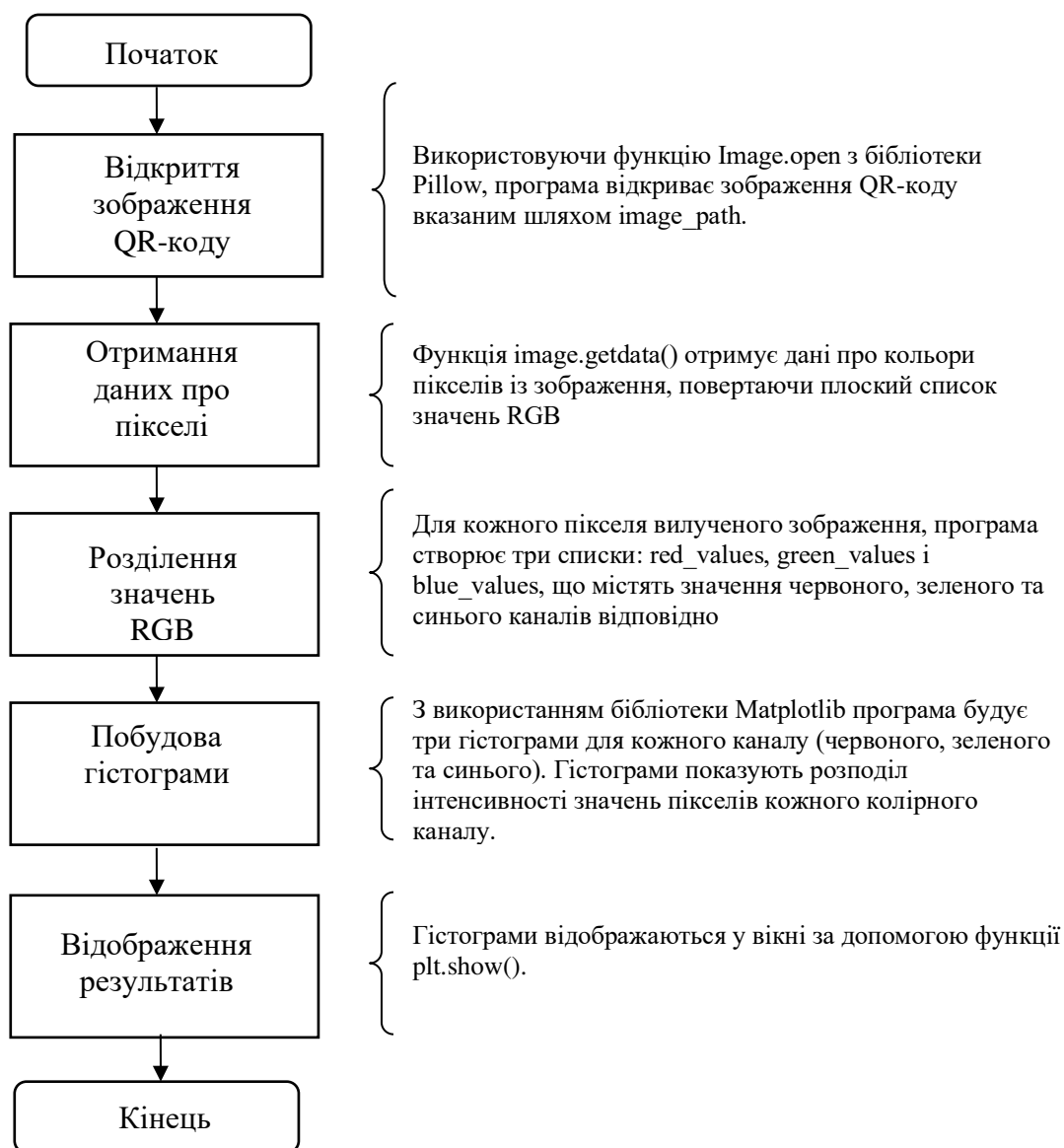


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд алгоритму побудови каналної гістограми

Програмну реалізацію запропонованого алгоритма наведено нижче:

```

import matplotlib.pyplot as plt
from PIL import Image

def plot_qr_histogram(image_path):
    # Відкриваємо зображення
    image = Image.open(image_path)
  
```

```
# Отримуємо дані про пікселі
pixel_values = list(image.getdata())

# Розділяємо значення RGB
red_values = [pixel[0] for pixel in pixel_values]
green_values = [pixel[1] for pixel in pixel_values]
blue_values = [pixel[2] for pixel in pixel_values]

# Будуємо гістограму для кожного каналу
plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 3, 1)
plt.hist(red_values, bins=256, color='red', alpha=0.7, rwidth=0.8)
plt.title('Red Channel')

plt.subplot(1, 3, 2)
plt.hist(green_values, bins=256, color='green', alpha=0.7, rwidth=0.8)
plt.title('Green Channel')

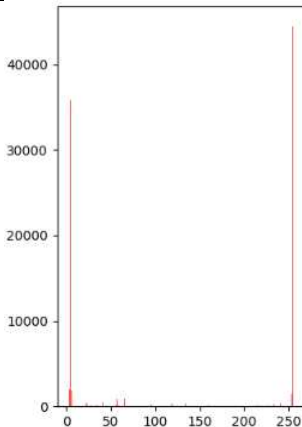
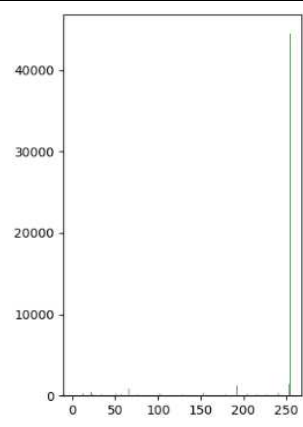
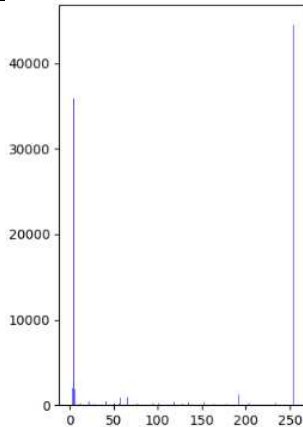
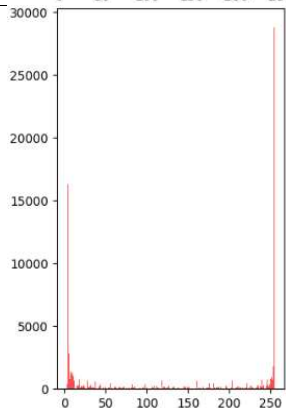
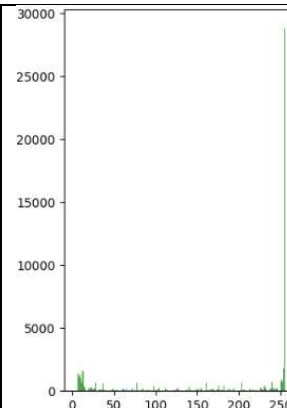
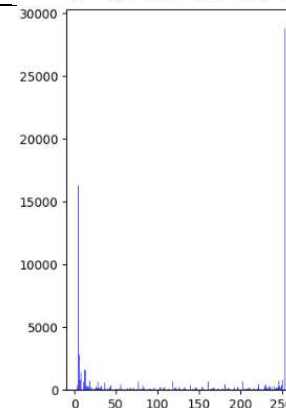
plt.subplot(1, 3, 3)
plt.hist(blue_values, bins=256, color='blue', alpha=0.7, rwidth=0.8)
plt.title('Blue Channel')

plt.tight_layout()
plt.show()

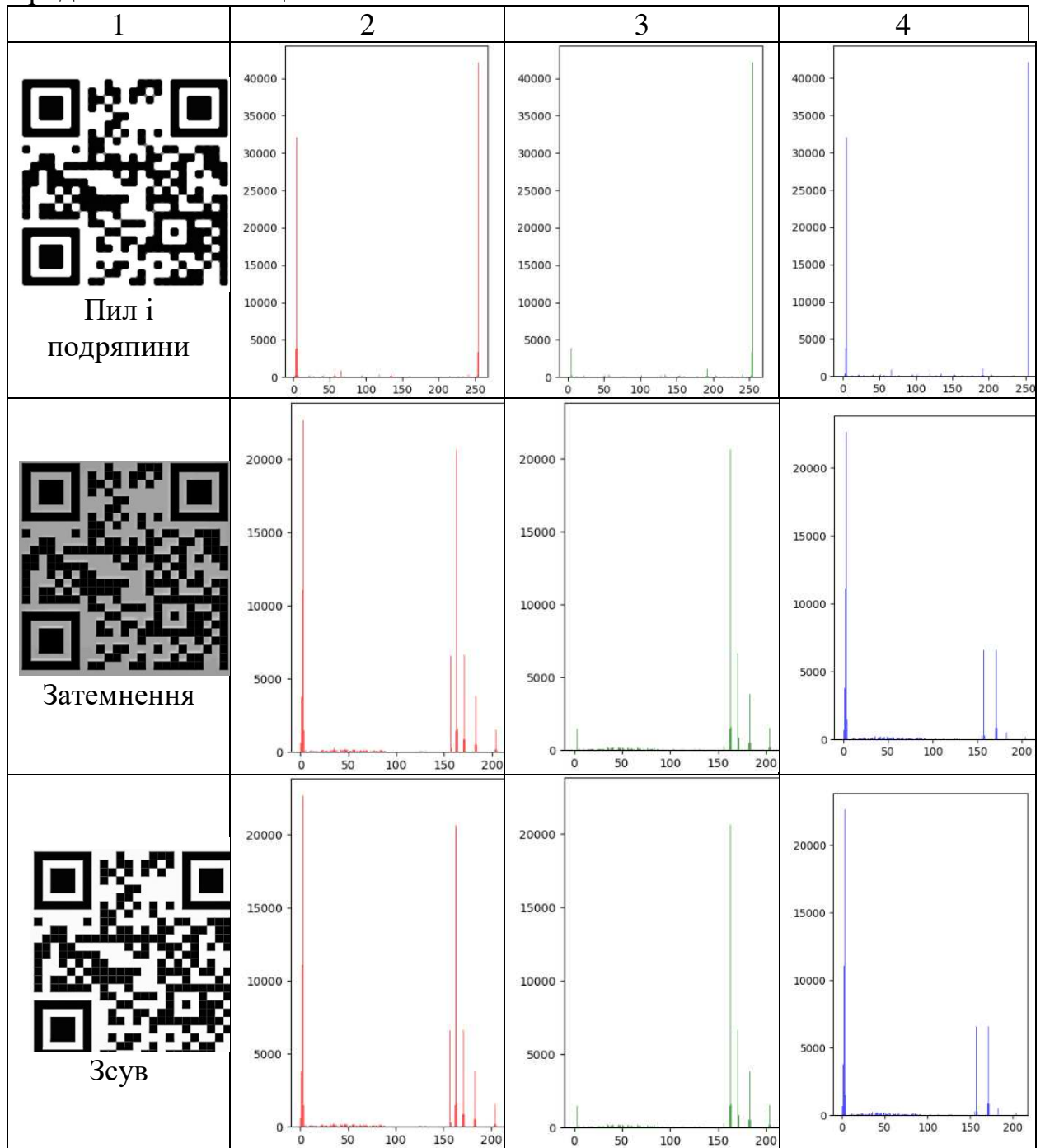
# Підключаємо зображення QR-коду
image_path = "Pic/qr_1.jpg"
plot_qr_histogram(image_path)
```

Для проведення дослідження скористаємося тестовими QR-кодами (рис. 3.2), і застосуємо до них можливі види деградації QR-коду, які можуть відбутися в реальному житті при транспортуванні або в момент сканування на конвеєрній лінії, що може спричинити втрату якості, а отже призвести до нечитабельності інформації. Також розглянемо обробку кольорових QR-кодів із тією ж інформацією. Результати проведення експерименту подамо у табл. 3.1.

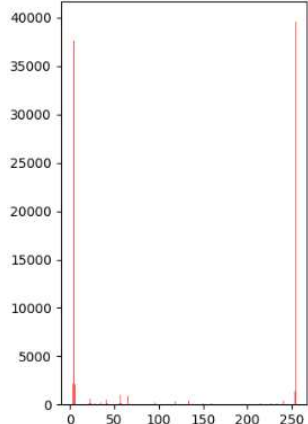
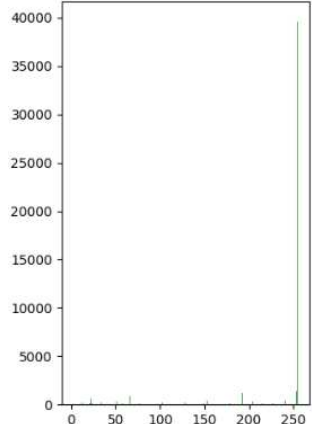
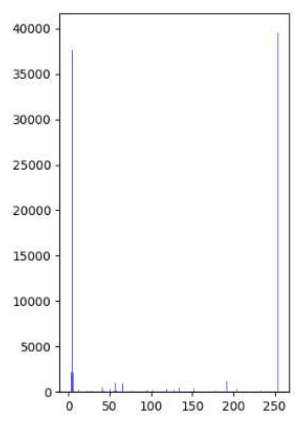
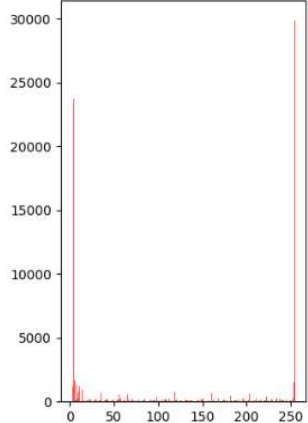
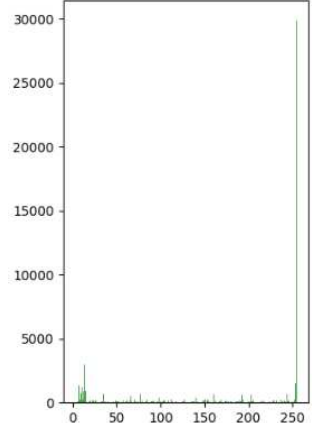
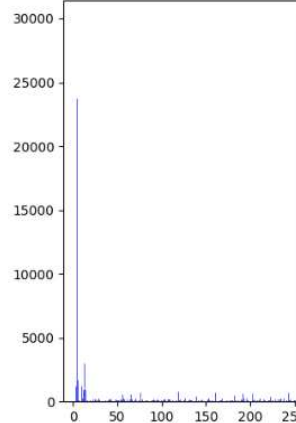
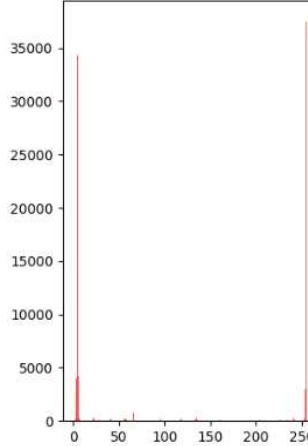
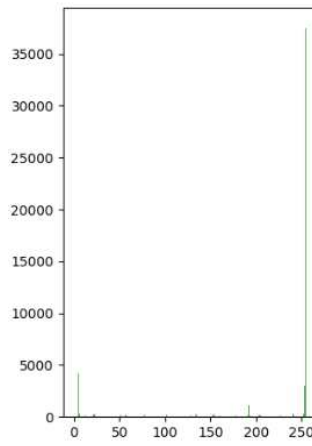
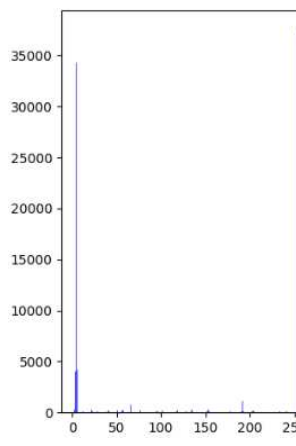
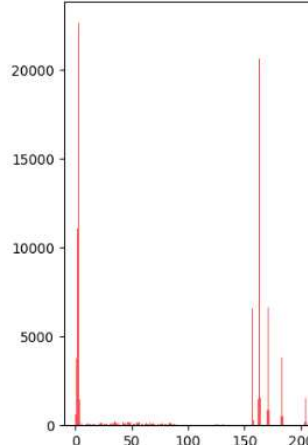
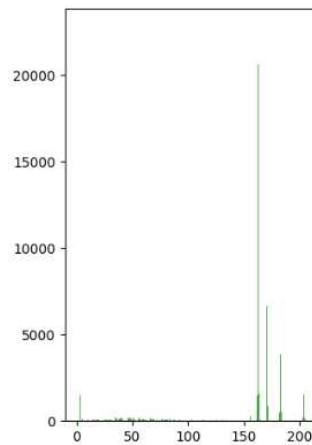
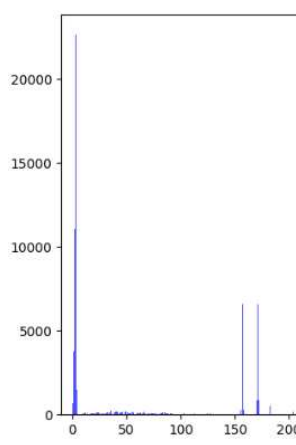
Таблиця 3.1 – Результати проведення експерименту з аналізу каналної гістограми при еталонному та деградаційних QR-кодах

QR-код	Результат каналної гістограми		
	Red channel	Green channel	Blue channel
1	2	3	4
 Еталонний (рис. 3.2, а)			
 Розмиття			

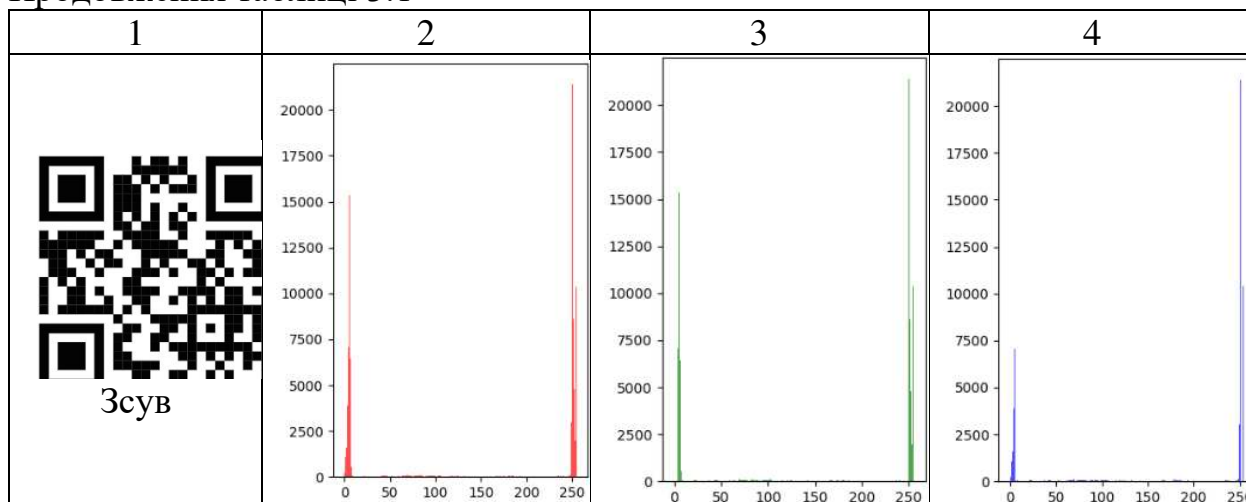
Продовження таблиці 3.1



Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
 Еталонний (рис. 3.2, д)			
 Розмиття			
 Пил і подряпини			
 Затемнення			

Продовження таблиці 3.1



Аналіз та порівняння каналних гістограм при еталонних та деградованих QR-кодах (таблиця 3.1), таких як розмиття, пил та подряпини, зсув, дозволяє надати важливу інформацію про стійкість QR-коду до зовнішніх впливів та здатність до його правильного зчитування. Канальна гістограма - це розподіл інтенсивності значень пікселів у кожному з кольорних каналів зображення. Виходячи з отриманих результатів експерименту можна бачити зробити такі висновки:

- ефект розмиття може призвести до втрати різкості меж та деталей QR-коду. З погляду каналної гістограми, при розмитті очікується більш розподілених значень інтенсивності, згладжених вершин гістограм;
- ефект пил і подряпини може призвести до точок або смуг, що вибиваються на QR-коді. Внаслідок чого на каналній гістограмі з'являться яскраво виражені "пікові" значення в каналах, що відповідають кольорам пилу або подряпин;
- ефект зсуву може призвести до неправильного вирівнювання ліній та структури QR-коду. Отже, на каналній гістограмі можна бачити зміщення пікових значень у каналах, що відображає зміну положення елементів QR-коду.

Проведемо низку експериментів перевірки стабільності отримання даних із фізично пошкоджених (сильно деградаційних) QR-кодів [123]. Для цього реалізуємо запропоновані методи у вигляді програмного забезпечення

та промодельовано фізично пошкоджені у відсотковому стані від загальної площі QR-коду;

Метою даного дослідження буде вивчення впливу фізичних пошкоджень QR-коду на ефективність та точність його зчитування;

Введемо такі змінні. Незалежна змінна – відсоток фізичних пошкоджень QR-коду. Залежна змінна – ефективність зчитування даних із QR-коду (наприклад, успішне розпізнавання даних);

Підготовка QR-кодів: Створення набору QR-кодів з різними рівнями ушкоджень (розмиття, подряпини, спотворення тощо). Це може бути зроблено програмно або за допомогою фізичних методів (наприклад, пошкодження паперового QR-коду);

Експерименти, що включають зчитування кожного QR-коду за допомогою сканера або камери, вимірювання часу, необхідного для зчитування, і оцінка точності розпізнавання даних;

Статистичний аналіз: Порівняння результатів для різних відсотків ушкоджень з використанням статистичних методів визначення статистичної значущості відмінностей.

Очікувані результати:

- визначення того, як різні види фізичних пошкоджень впливають на здатність зчитування QR-коду;
- виявлення порогового рівня пошкоджень, при якому зчитування стає неможливим або неефективним;
- пропозиція методів покращення зчитування QR-кодів за наявності фізичних ушкоджень.

Виходячи з поставленої мети перед розробкою програмного модуля для перевірки стабільності отримання даних з фізично пошкоджених (сильно деградаційних) QR-кодів, необхідно розробити загальний алгоритм, який представлено на рис. 3.7.

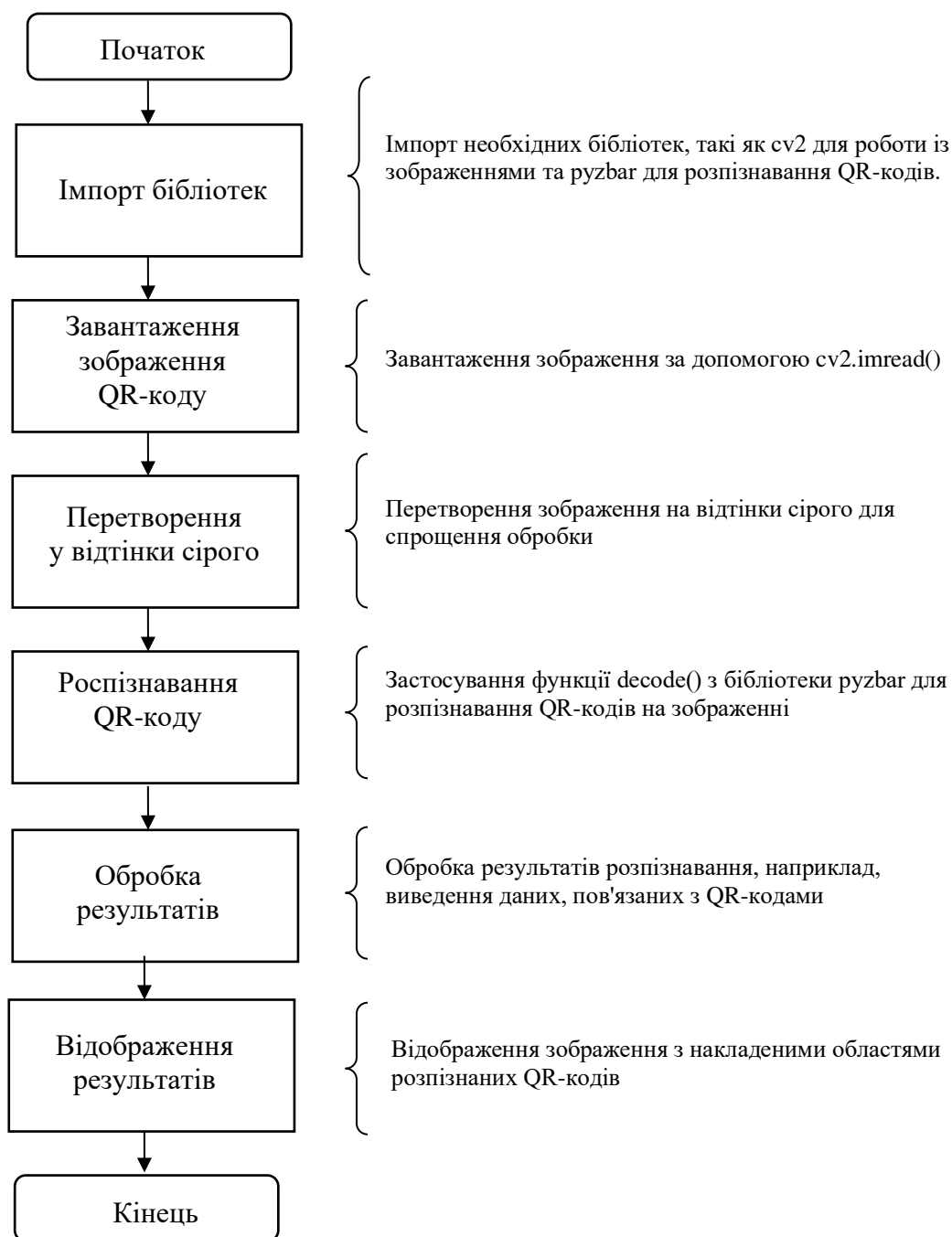


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд програмного алгоритму реалізації другого експерименту

Програмна реалізація другого експерименту з перевірки стабільності отримання даних з фізично пошкоджених (сильно деградаційних) QR-кодів.

```
import cv2
from pyzbar.pyzbar import decode
```

```

import numpy as np

def read_qr_code(image_path):
    # Завантаження зображення
    image = cv2.imread(image_path)

    # Перетворення зображення у відтінки сірого
    gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    # Декодування QR-кодів
    decoded_objects = decode(gray_image)

    # Обробка результатів
    for obj in decoded_objects:
        data = obj.data.decode('utf-8')
        print(f"QR Code Data: {data}")

    # Відображення рамки навколо QR-коду
    points = obj.polygon
    if points is not None and len(points) == 4:
        pts = np.array(points, dtype=np.int32)
        pts = pts.reshape((-1, 1, 2))
        cv2.polylines(image, [pts], isClosed=True, color=(0, 255, 0),
thickness=2)

    # Відображення зображення з рамками навколо QR-кодів
    cv2.imshow('QR Codes', image)
    cv2.waitKey(0)
    cv2.destroyAllWindows()

```

```
# Приклад використання функції для зчитування QR-кодів із зображення
image_path = 'C:\\Users\\Vladyslav\\Desktop\\QR_test\\qr_1.jpg'
read_qr_code(image_path)
```

Для проведення експерименту, реалізуємо масив QR-кодів з різними типами та відсотком співвідношенням пошкоджень, які імітують реальні пошкодження які можуть бути при транспортуванні об'єктів на конвеєрних лініях сортування фармацевтичної продукції, при цьому перевірялася можливість декодування інформації закованої всередині тестового QR-коду, розкодування. Отримані результати наведено у табл. 3.2.

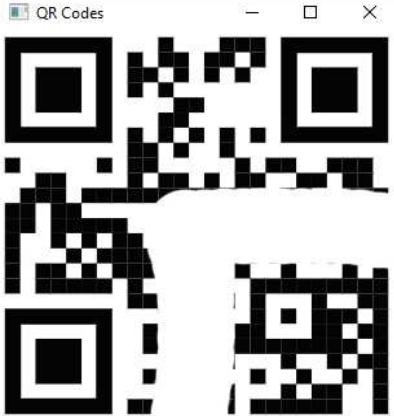
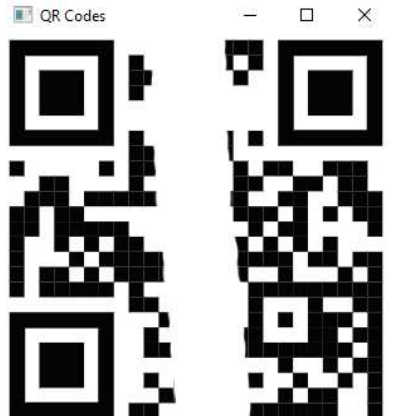
Таблиця 3.2 – Результати проведення другого експерименту

QR-код вихідний	QR-код в програмі	Результати розпізнавання інформації
1	2	3
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 12 мс)
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 23 мс)

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
		Інформацію не розпізнано
		Інформацію не розпізнано
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 56 мс)
		Інформацію не розпізнано

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
		Інформацію не розпізнано
		Інформацію не розпізнано
		Інформацію не розпізнано
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 112 мс)

Продовження таблиці 3.2

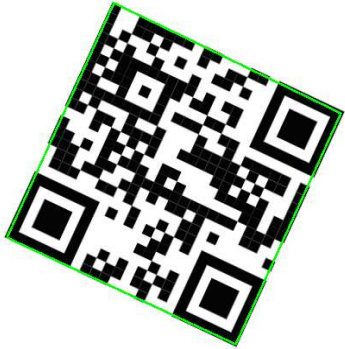
1	2	3
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 231 мс)
		QR Code Data: Test object No. 1 (час розпізнання ~ 189 мс)

Останнім кроком перевірки проведемо моделювання випадку, коли QR-код інформації про фармацевтичну продукцію, потрапляючи під систему комп'ютерного зору ідентифікації та розпізнавання об'єктів може перебувати під різними кутами, тобто конвеєрна лінія не має системи позиціонування та вирівнювання. Для цього експерименту візьмемо тестовий QR-код з наступної інформації: Test object No. 1. Отримані результати проведеного експерименту наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Отримані результати моделювання ідентифікації та розпізнавання під різними кутами.

Кут	QR-код в програмі	Час розпізнання	Результат
1	2	3	4
15 ⁰		34	QR Code Data: Test object No. 1
30 ⁰		56	QR Code Data: Test object No. 1
45 ⁰		49	QR Code Data: Test object No. 1
60 ⁰		74	QR Code Data: Test object No. 1

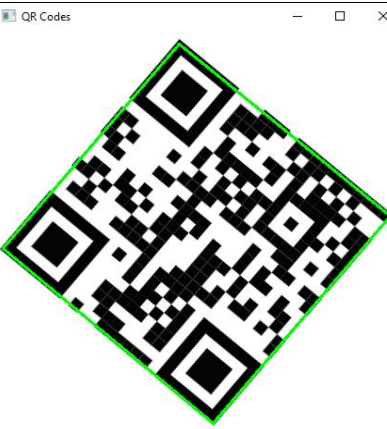
Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4
75^0		81	QR Code Data: Test object No. 1
90^0		12	QR Code Data: Test object No. 1
115^0		75	QR Code Data: Test object No. 1
130^0		86	QR Code Data: Test object No. 1

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4
145 ⁰		68	QR Code Data: Test object No. 1
160 ⁰		76	QR Code Data: Test object No. 1
175 ⁰		20	QR Code Data: Test object No. 1
190 ⁰		67	QR Code Data: Test object No. 1

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4
205°		92	QR Code Data: Test object No. 1
220		101	QR Code Data: Test object No. 1

Для зручності аналізу отриманих результатів третього експерименту представимо дані у вигляді графіка, який наведено на рис. 3.8.

Залежність часу розпізнавання від кута сканування QR-коду

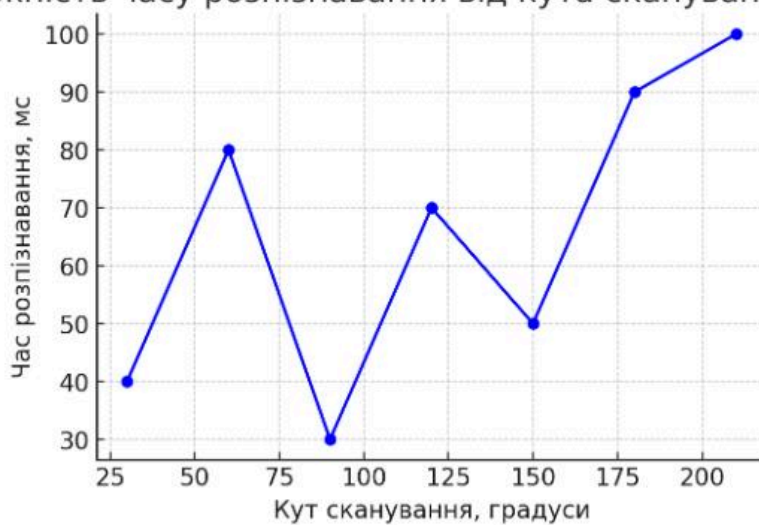


Рисунок 3.8 – Графік залежності часу розпізнавання від кута сканування QR-коду.

Всі наведені вище експерименти були повторені зі складними QR-кодом який, містить великий обсяг даних таких як: виробник; логістичні компанії; дистриб'ютори; аптечні організації; медичні організації, приклад такого коду наведено рисунку 3.9.

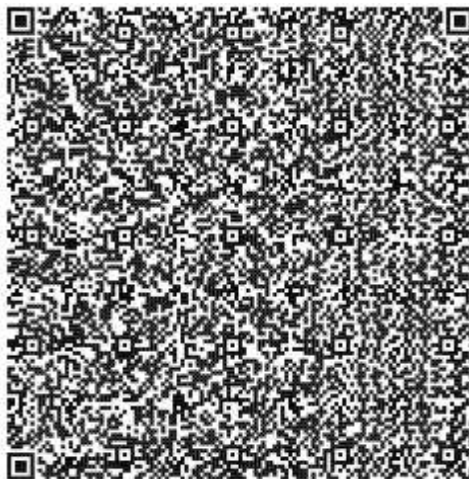


Рисунок 3.9 – Складний QR-код з великим обсягом даних

У цьому коді представлено наступну базову інформацію:

- тип продукту: Пігулки від кашлю "Комбі гриб";
- виробник: Фармацевтична компанія "Здоров'я-Мед";
- логістична інформація: Логістична компанія "ЛогістикаУкр";
- дистриб'ютор: Дистриб'юторська компанія "Медсервіс";
- аптечна організація: Аптечна мережа "ЗаЗдоров'я";
- медична організація: Міська лікарня №1.

Проведемо повторно третій експеримент зі складним QR-кодом з великим обсягом даних, який представлений на рис. 3.9. Результати отримані під час проведення експерименту представлені рисунку 3.10 у вигляді графіка залежності часу розпізнавання від кута сканування складного QR-коду з великим обсягом даних.

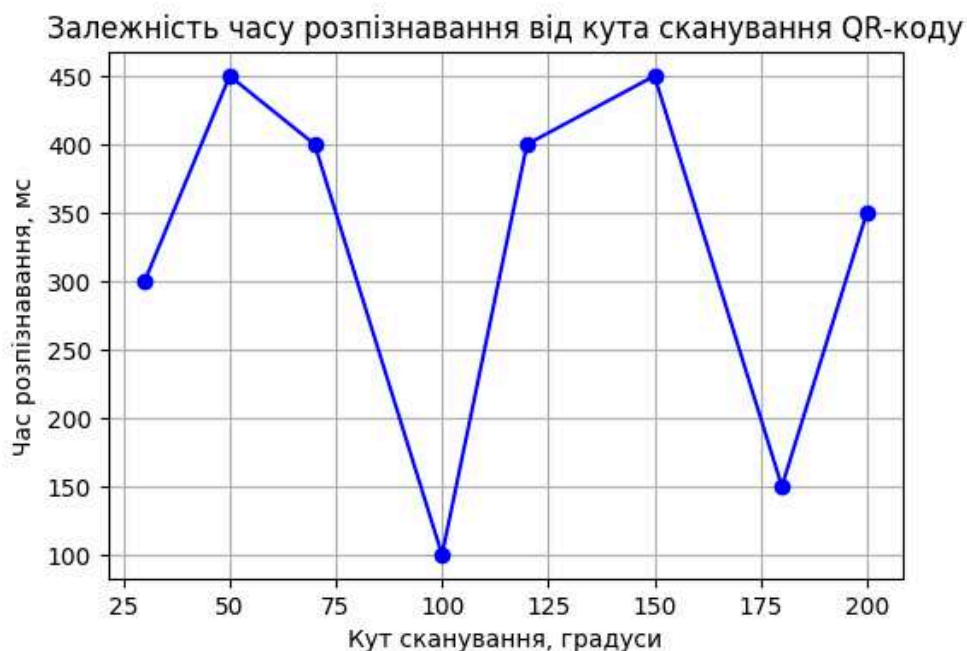


Рисунок 3.10 – Графік залежності часу розпізнавання від кута сканування складного QR-коду з великим обсягом даних

3.5 Багатофакторний експеримент

Для реалізації багатофакторного експерименту [91, 124] необхідно побудувати математичну модель та описати кроки для аналізу впливу змінних (швидкість конвеєра, освітленість і орієнтація упаковки) на результати розпізнавання на фармацевтичній конвеєрній лінії.

Визначимо фактори і рівень експерименту:

- швидкість конвеєра V має три рівні: $V_1 = 0.15 \text{ М/с}$, $V_2 = 0.22 \text{ М/с}$, $V_3 = 0.3 \text{ М/с}$;
- освітленість робочої зони L має три рівні: низька (L_1), середня (L_2), висока (L_3);
- орієнтація упаковки θ має три рівні: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_3 = 60^\circ$.

Для вимірювання параметрів швидкості конвеєра, освітленості робочої зони та орієнтації упаковки на фармацевтичній конвеєрній лінії під час експериментів пропонується наступне обладнання, загальний вигляд якого представлений на рис. 3.11.



а)



б)



в)

а) Лазерний тахометр Extech 461920; []

б) Люксометр Testo 540; []

в) Цифровий кутомір Bosch GIM 120; []

Рисунок 3.11 – Загальний вигляд обладнання для вимірювання показників

В табл. 3.4 наведено технічні характеристики обраного обладнання: лазерного тахометра Extech 461920, люксометра Testo 540 та цифрового кутоміра Bosch GIM 120.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики обраного обладнання

Параметр	Лазерний тахометр Extech 461920	Люксметр Testo 540	Цифровий кутомір Bosch GIM 120
Виробник	Extech Instruments (США)	Testo (Німеччина)	Bosch (Німеччина)
Діапазон вимірювань	0,5 – 1999,9 м/хв (лінійна швидкість)	0 – 99,999 лк	0° – 120°
Точність вимірювань	±0,05% від показника	1 лк	0,1°
Тип датчика	Лазерний	Датчик світлового потoku	Магнітний сенсор
Особливості	Підтримка як контактного, так і безконтактного вимірювання	Компактний, легкий, зручний для роботи на ходу	Автоматичне збереження значень, бульбашковий рівень
Робоча температура	0°C – 50°C	0°C – 40°C	-10°C – 50°C
Екран	Цифровий LCD- дисплей	Цифровий дисплей	Цифровий дисплей з підсвічуванням
Живлення	4 батарейки типу AA	Батарейка CR2032	1 батарейка 9В
Розмір / Вага	210 x 75 x 50 мм / 300 г	111 x 51 x 28 мм / 95 г	523 x 27 x 60 мм / 830 г

Обране обладнання для багатофакторного експерименту забезпечує високу точність та відповідність вимогам фармацевтичного виробництва. Лазерний тахометр Extech 461920 із діапазоном вимірювання від 0,5 до 1999,9 м/хв і точністю $\pm 0,05\%$ дозволяє ефективно контролювати швидкість конвеєра, що є критичним параметром для розпізнавання об'єктів. Люксметр Testo 540, із діапазоном від 0 до 99,999 лк та точністю $\pm 3\%$, забезпечує надійне вимірювання освітленості робочої зони, важливої для точності розпізнавання. Цифровий кутомір Bosch GIM 120 має високу точність 0,1° і широкий діапазон до 120°, що дозволяє коректно вимірювати орієнтацію упаковки на конвеєрі. У порівнянні з іншими пристроями, дані моделі оптимально поєднують портативність та легкість у використанні, зберігаючи при цьому високий рівень точності. Компактні та зручні дисплеї кожного з приладів сприяють

швидкому зчитуванню результатів, що забезпечує оперативність експерименту та знижує похибки вимірювань, особливо в умовах багаторазових повторень експерименту для досягнення надійних даних.

При плануванні багатофакторного експерименту, кількість комбінацій всіх факторів становить:

$$N = k^f = 3^3 = 27 \quad (3.54)$$

де $k = 3$ – кількість рівнів кожного фактору;

f – кількість факторів.

Розробимо наступну модель взаємодії факторів для проведення експерименту у вигляді:

$$y = \beta_0 + \beta_1 V + \beta_2 L + \beta_3 \theta + \beta_{12} VL + \beta_{13} V\theta + \beta_{23} L\theta + \beta_{123} VL\theta + \epsilon \quad (3.55)$$

де y – вихідний показник ефективності (час розпізнавання, точність або кількість помилкових ідентифікацій),

β_i – коефіцієнти впливу кожного фактору;

ϵ – похибка.

Для проведення експерименту кожену комбінацію умов потрібно запускати кілька разів для підвищення точності. Нехай кожна комбінація повторюється r разів (наприклад 3 рази). Тоді загальна кількість вимірювань можна подати у наступний спосіб:

$$N_{total} = N \times r = 27 \times 3 = 81 \quad (3.56)$$

Для кожної комбінації розраховуються середні значення показників ефективності:

$$\bar{y}_{ijl} = \frac{1}{r} \sum_{l=1}^r y_{ijkl} \quad (3.57)$$

де i, j, k – індекси рівнів факторів,

l – індекс повторення.

Для аналізу результатів використовуються наступні кроки:

1. Розрахунок дисперсії факторів для перевірки впливу факторів на показники ефективності.

2. Аналіз варіацій (ANOVA) для кожного фактору, що дозволяє виявити значущі фактори та їх взаємодії. Статистичне значення для кожного фактору перевіряється за критерієм Фішера (F-критерієм).

Формула для розрахунку середньоквадратичного відхилення для кожного фактору будемо проводити наступним чином:

$$S_f^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1} \quad (3.58)$$

де $\bar{y}$ – середнє значення всіх вимірів;

N – загальна кількість комбінацій.

Визначимо наступні впливи факторів:

– якщо значення F -критерію для фактора більше критичного значення, вплив фактора значущий;

– коефіцієнт β використовуються для визначення напрямку і сили впливу.

За результатами експерименту можна встановити, які комбінації факторів оптимально впливають на кожен показник, наприклад:

– найменший час розпізнавання;

– максимальна точність;

– мінімальна кількість помилкових ідентифікацій.

Цей підхід дозволить вибрати оптимальні рівні для кожного з факторів та покращити систему розпізнавання.

Результати проведеного експерименту наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати проведення експерименту

Швидкість (м/с)	Рівень освітленості	Орієнтація (градуси)	Час розпізнавання (с)	Точність (%)	Кількість помилки
1	2	3	4	5	6
0.15	Низький	0	1.23	98.5	1
0.15	Низький	30	1.15	96.2	0
0.15	Низький	60	1.34	97.1	2
0.15	Середній	0	1.45	94.3	1
0.15	Середній	30	1.37	95.8	0
0.15	Середній	60	1.29	93.5	3
0.15	Високий	0	1.17	99.0	0
0.15	Високий	30	1.32	97.8	1
0.15	Високий	60	1.25	96.4	2
0.22	Низький	0	1.11	92.5	3
0.22	Низький	30	1.19	91.8	2
0.22	Низький	60	1.26	90.7	4
0.22	Середній	0	1.38	94.9	1
0.22	Середній	30	1.25	96.1	0
0.22	Середній	60	1.30	93.8	2
0.22	Високий	0	1.23	95.4	1
0.22	Високий	30	1.19	97.3	0

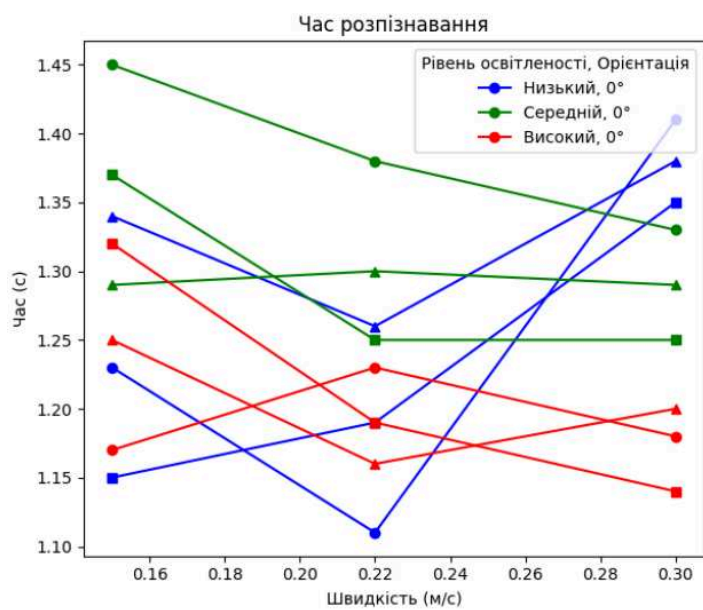
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6
0.22	Високий	60	1.16	96.2	1
0.3	Низький	0	1.41	89.5	5
0.3	Низький	30	1.35	88.2	4
0.3	Низький	60	1.38	87.1	3
0.3	Середній	0	1.33	91.2	2
0.3	Середній	30	1.25	92.3	1
0.3	Середній	60	1.29	90.9	3
0.3	Високий	0	1.18	95.8	1
0.3	Високий	30	1.14	96.5	0
0.3	Високий	60	1.20	94.4	2

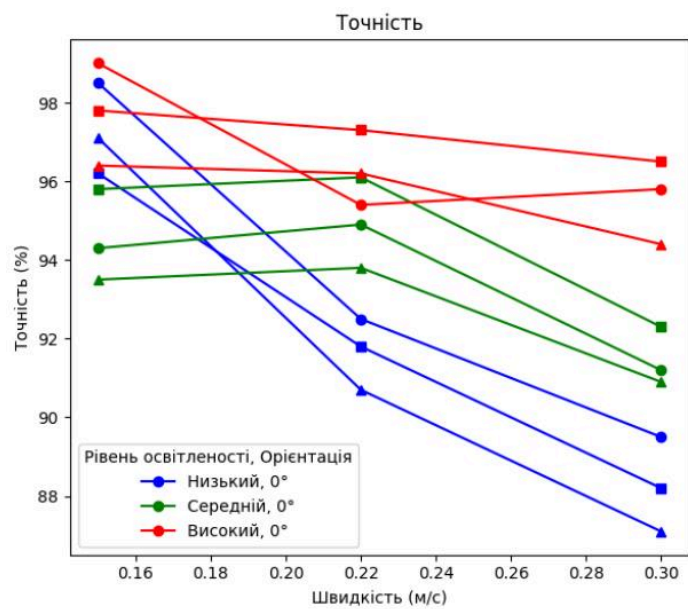
Наведемо пояснення значень в табл. 3.5:

- швидкість конвеєра має три рівні (0.15; 0.22; 0.3 М/с);
- рівень освітленості: низький – 100–300 лк (приблизний рівень, що використовується для мінімальної видимості в складських або технічних зонах); середній – 400–600 лк (рівень, достатній для загальної роботи на виробничій лінії) та високий – 700–1000 лк (рівень освітлення для точних виробничих або контрольних завдань, таких як сортування або контроль якості);
- орієнтація (градуси) кути повороту упаковки (0°, 30°, 60°);
- час розпізнавання (с) показує тривалість розпізнавання в секундах;
- точність (%) – це відсоток успішного розпізнавання;
- кількість помилок – це кількість помилкових ідентифікацій при певній комбінації параметрів.

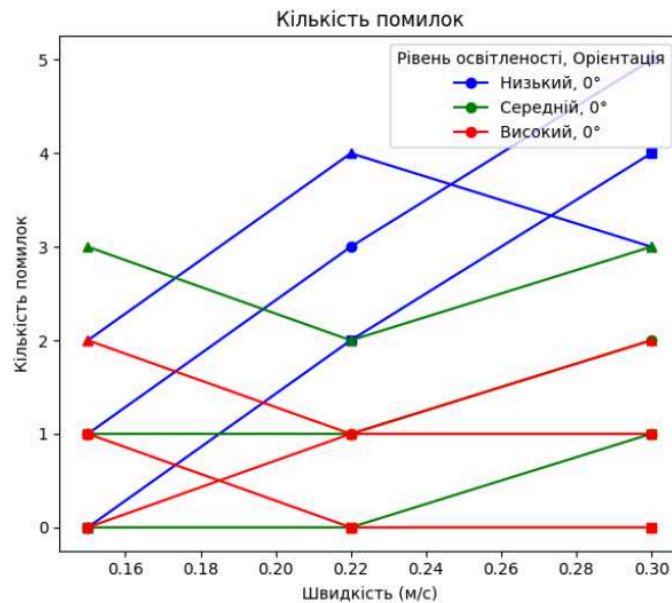
Представимо отримані результати експерименту у вигляді комбінованого графіка на рис. 3.12.



а)



б)



в)

а) показує залежність часу розпізнавання від швидкості конвеєра при різних рівнях освітленості та орієнтації упаковки

б) показує залежність точності від швидкості для різних комбінацій освітленості й орієнтації

в) відображає кількість помилок у залежності від швидкості, освітленості й орієнтації.

Рисунок 3.12 – Комбінований графік отриманих результатів експерименту

Проведений експеримент показує чіткі тенденції щодо впливу різних параметрів на ефективність системи розпізнавання. Порівняння результатів за швидкістю конвеєра вказує на те, що найнижчий час розпізнавання та найвища точність досягаються при середній швидкості, тоді як при максимальній швидкості кількість помилкових ідентифікацій зростає, особливо за низького рівня освітленості. Порівняння рівнів освітленості демонструє, що при високому рівні система розпізнає об'єкти точніше, з меншою кількістю помилок та із загалом стабільнішими показниками часу розпізнавання. Це свідчить про те, що освітленість є критичним фактором, який посилює або знижує вплив інших параметрів. Щодо орієнтації упаковки, найбільш ефективними є кути 0° та 30° , тоді як при орієнтації на 60° точність

знижується, а помилки зростають, особливо за низького рівня освітлення та високої швидкості.

Таким чином, порівняльний аналіз даних дозволяє дійти висновку, що оптимальною комбінацією параметрів для забезпечення точного розпізнавання є середня швидкість конвеєра, високий рівень освітленості та орієнтація упаковки під кутом 0° . За таких умов система досягає найвищих показників точності та найнижчого рівня помилок. Це підтверджує важливість комбінування параметрів для досягнення стабільної та ефективної роботи, що особливо корисно при автоматизації на фармацевтичних лініях, де важливі мінімізація помилок і висока швидкість роботи. Результати таблиці підкреслюють, що збалансовані параметри дозволяють значно підвищити продуктивність та якість розпізнавання, що є ключовим для ефективного функціонування всієї системи.

3.6 Висновки за розділом 3

У третьому розділі дисертації було удосконалено методи ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції з використанням систем комп'ютерного зору. Основна увага була приділена вдосконаленню методу нормалізації кадру зображення QR-коду. Це вдосконалення полягало в заміні шумового пікселя середнім значенням, розрахованим з урахуванням всіх пікселів, що дозволило суттєво покращити якість розпізнавання інформації на QR-коді за різних умов, включаючи зовнішні впливи під час процесу сортування. Крім того, було вдосконалено метод кодування інформації шляхом використання поліном-генератора на основі коду Ріда-Соломона, що значно покращило зчитування інформації з QR-кодів навіть у випадках їх часткового пошкодження або стертості. Це забезпечує підвищення надійності передачі даних на конвеєрній лінії. Також розроблено новий метод розкодування інформації з виправленням помилок і описок, що базується на алгоритмі Форні. Даний підхід дозволяє точно

визначати та коригувати помилки, які можуть виникнути під час передачі інформації на етапі сканування QR-кодів. Крім цього, було проведено моделювання різних типів пошкоджень QR-кодів на конвеєрній лінії, що дозволило оптимізувати алгоритми обробки даних при роботі з пошкодженими кодами. Наукова новизна цього розділу полягає в удосконаленні методів нормалізації зображень QR-кодів, кодування інформації, а також у впровадженні нових підходів до розкодування пошкоджених даних, що значно підвищує ефективність систем сортування фармацевтичної продукції.

Основні результати третього розділу опубліковано у роботах [111, 119, 122, 123]. Список джерел, які використано у третьому розділі, наведено у переліку джерел посилань [91, 106-110, 112-118, 120, 121, 124]

4 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ КОНВЕЄРНОЇ ЛІНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Математична модель автоматичного керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції на базі ПД-регуляторів

4.1.1 Постановка задачі моделювання

Сучасні системи автоматизації є невід’ємною частиною різних галузей промисловості, зокрема фармацевтичної. Використання роботизованих конвеєрних ліній для сортування продукції дозволяє підвищити ефективність, точність і швидкість виробничих процесів. Така автоматизація знижує ризик людських помилок, що є особливо важливим у фармацевтиці, де контроль якості та точність відіграють критичну роль.

На основі наведеної структурної схеми (рис. 4.1) можна детально розглянути автоматизовану конвеєрну лінію для сортування фармацевтичної продукції, яка включає в себе різні компоненти, що працюють у взаємодії.

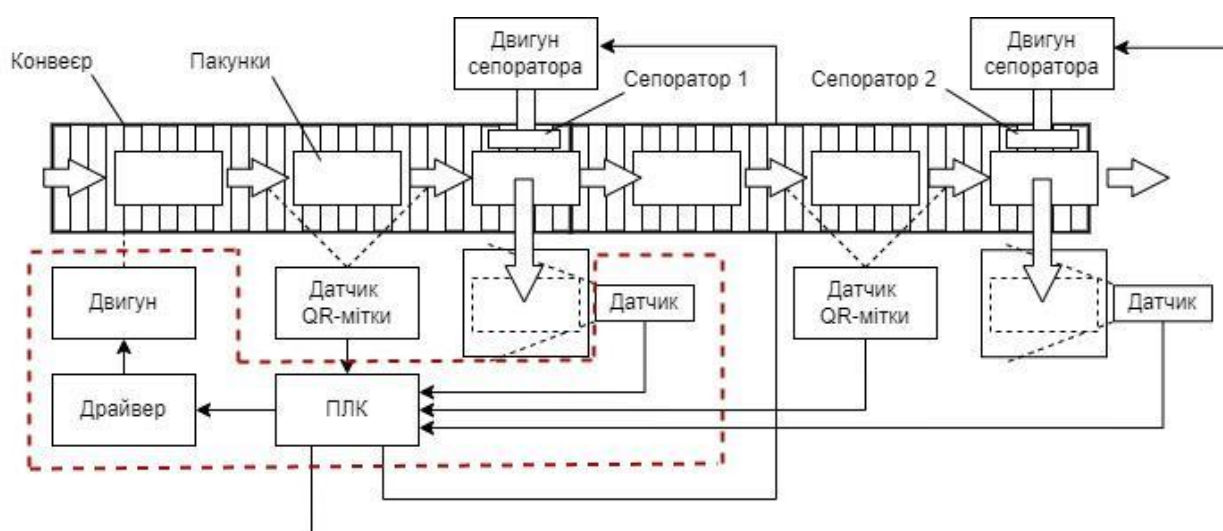


Рисунок 4.1 – Структурна схема автоматичної конвеєрної лінії для сортування фармацевтичної продукції

Основною частиною цієї системи є конвеєр, що відповідає за переміщення пакунків із фармацевтичною продукцією вздовж лінії. Пакунки рухаються по конвеєру, проходячи через різні етапи обробки і сортування.

Ключову роль у процесі сортування відіграють датчики QR-міток, які розташовані на різних етапах лінії. Вони зчитують QR-коди з пакунків і передають зібрану інформацію до програмованого логічного контролера (ПЛК). QR-коди містять дані про тип і характеристики продукції, що дозволяє визначити, як саме слід сортувати пакунки на наступних етапах.

ПЛК є центральним елементом автоматизації, який керує всією системою. Він обробляє інформацію, отриману від датчиків, і на основі запрограмованих алгоритмів керує роботою конвеєра та сортувальних механізмів. ПЛК контролює роботу двигунів конвеєра та сепараторів, а також дає команди на виконання певних дій залежно від даних, отриманих від QR-кодів.

На початку лінії пакунки можуть бути відсортовані за допомогою сепаратора 1, який керується відповідним електроприводом. Цей механізм фізично відокремлює продукцію в один із напрямків на основі інформації, отриманої від ПЛК. Сепаратор дає змогу розділяти продукцію за певними параметрами, наприклад, за типом або на основі сканування QR-міток.

На кожному етапі лінії розташовані датчики QR-міток, які виконують функцію зчитування інформації з фармацевтичної продукції. Ці QR-коди містять дані, необхідні для визначення подальшої обробки кожного пакунку. Інформація, отримана з QR-кодів, передається на програмований логічний контролер (ПЛК), який обробляє ці дані та приймає рішення щодо сортування. Датчики також можуть вимірювати інші параметри пакунків, наприклад, їх розміри чи вагу, що дозволяє більш точно сортувати продукцію відповідно до вимог.

Робот-маніпулятор виконує функції, схожі на сепаратор, але має більш гнучкі можливості для сортування пакунків. Він здатен обробляти продукцію

з більшою точністю та виконувати складніші маніпуляції, такі як захоплення і розміщення пакунків у потрібних місцях. Робот-маніпулятор отримує команди від ПЛК, який контролює його рух і дії на основі даних, отриманих від датчиків.

Заміна сепаратора на роботизований маніпулятор надає додаткові переваги в процесі сортування. Маніпулятор може працювати з різними типами продукції, регулюючи силу захоплення та позиціонування пакунків. Це дозволяє досягти більш високої гнучкості у виробничому процесі, особливо коли необхідно сортувати продукцію різних розмірів або форм.

Керування рухом конвеєра забезпечується двигуном конвеєра, який підключений через драйвер двигуна до ПЛК. Драйвер дозволяє регулювати швидкість і напрямок руху конвеєра, що дозволяє синхронізувати рух пакунків із роботою сортувальних механізмів. Данна зона позначено червоним контуром (рис. 4.1), та є ціллю розробки моделі курування швидкістю конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції.

Автоматичне керування роботизованою конвеєрною лінією сортування фармацевтичної продукції базується на сучасних методах автоматизації, що включають використання датчиків, ПЛК і роботизованих систем. Завдяки інтеграції цих елементів система забезпечує високу точність, швидкість і гнучкість у сортуванні продукції, що особливо важливо для фармацевтичної промисловості.

Моделювання системи керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції базується на розробці алгоритмів регулювання, що забезпечують високу точність і стабільність роботи.

Метою моделювання є створення ефективної системи автоматичного керування швидкістю конвеєра на основі ПД-регулятора, що дозволить підтримувати необхідний режим руху продукції, мінімізувати вплив зовнішніх збурень та забезпечити відповідність технологічним вимогам виробництва.

У процесі моделювання будуть вирішені завдання:

- аналізу динамічних характеристик системи;

- розробки математичних моделей для опису поведінки електроприводу і конвеєрної стрічки;

- вибір параметрів ПД-регулятора та перевірки ефективності системи керування за допомогою чисельного моделювання.

Гіпотеза моделювання полягає в тому, що використання ПД-регулятора з оптимальними параметрами дозволить зменшити час встановлення швидкості, уникнути значних перерегулювань та забезпечити стабільну роботу системи в умовах змінного навантаження на конвеєрі.

Критерієм оцінки результатів є досягнення заданої швидкості руху конвеєрної стрічки з мінімальним часом перехідного процесу, відсутність значних коливань та перерегулювань, а також відповідність отриманих характеристик системи заданим вимогам щодо точності та швидкодії.

4.1.2 Розробка моделі керування

Розробка моделі керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції на базі ПД-регуляторів є необхідною для забезпечення стабільності, точності та ефективності виробничого процесу. Оскільки фармацевтична продукція має високі вимоги до якості та відповідності стандартам, будь-які відхилення у швидкості руху конвеєра можуть призводити до нерівномірного розподілу продукції, збоїв у сортуванні або пошкодження упаковки. Використання ПД-регулятора дозволяє автоматично компенсувати зміни навантаження на конвеєрі, температурні та механічні впливи, що забезпечує підтримку оптимальної швидкості незалежно від зовнішніх факторів. Інтеграція такої системи дозволяє підвищити продуктивність, зменшити кількість дефектів та мінімізувати втручання оператора, що особливо важливо для фармацевтичної галузі, де дотримання точності та надійності має критичне значення. Крім того, впровадження автоматичного керування знижує енергоспоживання та продовжує термін експлуатації обладнання за рахунок плавного регулювання швидкості. Враховуючи сучасні вимоги до автоматизації виробництва, використання

ПД-регуляторів є оптимальним рішенням для підвищення ефективності та якості процесу сортування фармацевтичної продукції. Система автоматичного керування (САК) швидкістю конвеєрної лінії складається з наступних елементів, як представлено на рис. 4.2.

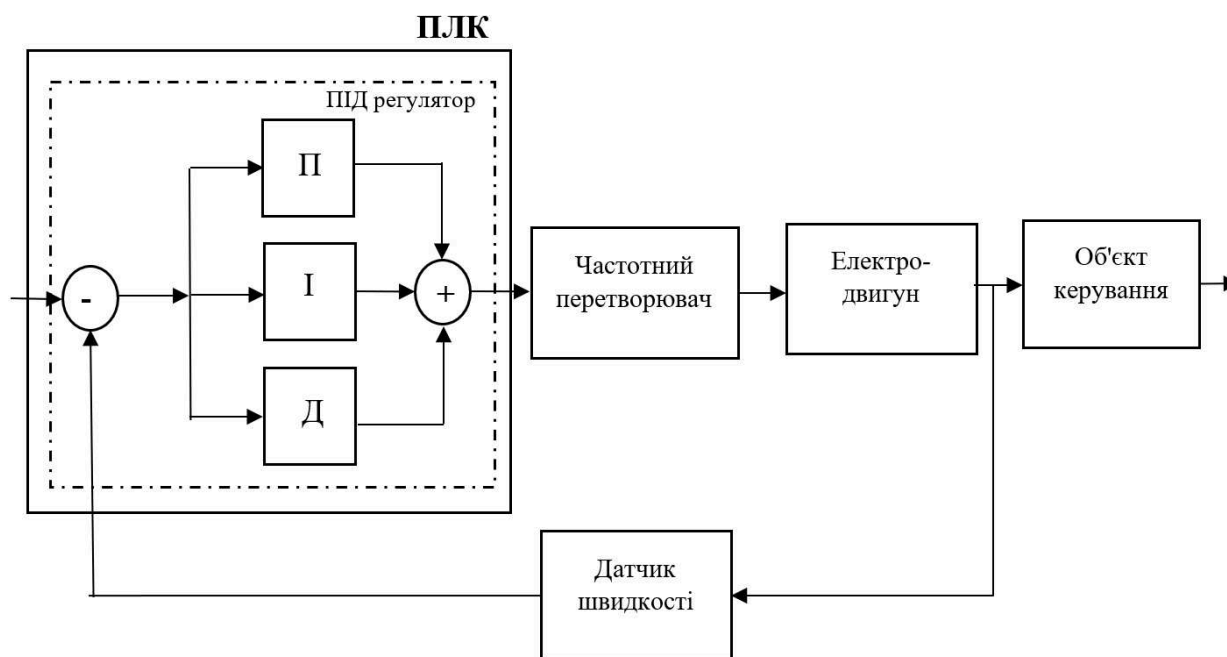


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи автоматичного керування швидкістю конвеєрної лінії для сортування фармацевтичної продукції

Структурна схема системи автоматичного керування швидкістю конвеєрної лінії для сортування фармацевтичної продукції складається з таких основних компонентів:

- контролер, реалізує алгоритм ПД-регулювання для підтримки заданої швидкості;
- частотний перетворювач (привод), керує електродвигуном шляхом зміни напруги або частоти;
- електродвигун, забезпечує рух конвеєрної стрічки;
- датчик швидкості (енкодер), вимірює фактичну швидкість руху стрічки;

– об'єкт керування (конвеєрна лінія) – включає механічні частини, ролики, стрічку тощо.

Зворотний зв'язок здійснюється через датчик швидкості, який передає значення на контролер для корекції швидкості.

Для опису динаміки системи розглянемо електропривод конвеєрної стрічки, де використовується двигун постійного струму або асинхронний двигун з частотним регулюванням. Математична модель електродвигуна у спрощеному вигляді може бути представлена передаточною функцією першого порядку:

$$W_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (4.1)$$

де $\Omega(s)$ – вихідна змінна (кутова швидкість двигуна),

$U(s)$ – вхідна змінна (напруга на двигуні);

K_m – коефіцієнт підсилення двигуна;

T_m – стала часу двигуна.

При врахуванні моменту інерції J та коефіцієнта в'язкого тертя B , передаточна функція двигуна може бути отримана з рівняння руху:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + B\Omega = K_m U \quad (4.2)$$

Після перетворення Лапласа:

$$\Omega(s)(Js + B) = K_m U(s) \quad (4.3)$$

Звідси передаточна функція електродвигуна може бути представлена:

$$W_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{Js + B} \quad (4.4)$$

Якщо, $T_m = \frac{J}{B}$, то отримуємо передаточну функцію першого порядку.

Модель конвеєра може бути представлена передаточною функцією другого порядку, оскільки враховуються інерційні та демпфуючі ефекти стрічки:

$$W_c(s) = \frac{V(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_c}{T_c^2 s^2 + 2\xi T_c s + 1} \quad (4.5)$$

де $V(s)$ – лінійна швидкість стрічки;

K_c – коефіцієнт передатного відношення приводу до швидкості стрічки;

T_c – механічна стала часу конвеєра;

ξ – коефіцієнт демпфування механічної системи.

Виходячи з цього, повна передаточна функція системи "електродвигун + конвеєрна стрічка" буде наступна:

$$W_{sys}(s) = W_m(s) \cdot W_c(s) = \frac{K_m K_c}{(T_m s + 1)(T_c^2 s^2 + 2\xi T_c s + 1)} \quad (4.6)$$

Регулювання швидкості конвеєра за допомогою ПІД-регулятора, якій має наступну передаточну функцію:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.7)$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт;

K_i – інтегральний коефіцієнт;

K_d – диференціальний коефіцієнт.

На основі (4.6) та (4.7), виведемо загальну передаточну функцію замкнутої системи:

$$W_{cl}(s) = \frac{W_{sys}(s)}{1 + W_{PID}(s)W_{sys}(s)} \quad (4.8)$$

де $W_{cl}(s)$ – передаточна функція замкненої системи, яка описує реакцію системи на вхідний сигнал (задану швидкість) з урахуванням дії ПД-регулятора та динаміки конвеєра;

$W_{PID}(s)$ – передаточна функція ПД-регулятора, що визначає, як регулятор впливає на об'єкт керування для досягнення бажаної швидкості;

$W_{sys}(s)$ – передаточна функція відкритої системи (об'єкта керування), що описує динамічні властивості конвеєрного приводу та стрічки;

$1 + W_{PID}(s)W_{sys}(s)$ – знаменник, що включає характеристичне рівняння замкненої системи, яке визначає її стійкість та поведінку при різних режимах роботи.

Вираз (4.8) відображає вплив регулятора на систему, забезпечуючи необхідну стабілізацію швидкості конвеєра шляхом мінімізації відхилень від заданого значення та компенсуючи зовнішні збурення.

Налаштування ПД-регулятора можливо проводить за допомогою методів Зіглера-Ніколса або через адаптивні алгоритми.

Для перевірки правильності запропонованих моделей керування швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції на базі ПД-регуляторів, розробим програму для побудови передаточної функцій електродвигуна та конвеєрної стрічки з використанням мови високого рівня програмування Python, та середовища розробки PyCharm 2022.2.3.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import control as ctrl # Бібліотека для аналізу динамічних систем

# Параметри електродвигуна
K_m = 10 # Підсилення двигуна
```

$T_m = 0.5$ # Стала часу двигуна

Передаточна функція електродвигуна (перший порядок)

$W_m = \text{ctrl.tf}([K_m], [T_m, 1])$

Параметри конвеєрної лінії

$K_c = 5$ # Коефіцієнт передачі конвеєра

$T_c = 1.0$ # Механічна стала часу конвеєра

$\xi = 0.9$ # Коефіцієнт демпфування (підвищений для стійкості)

Передаточна функція конвеєра (другий порядок)

$W_c = \text{ctrl.tf}([K_c], [T_c**2, 2 * \xi * T_c, 1])$

Повна передаточна функція системи "електродвигун + конвеєрна стрічка"

$W_{sys} = W_m * W_c$

Оптимізовані параметри ПІД-регулятора для стійкої системи

$K_p = 5.0$ # Пропорційний коефіцієнт (збільшений для швидшої реакції)

$K_i = 2.0$ # Інтегральний коефіцієнт (для мінімізації статичної помилки)

$K_d = 1.5$ # Диференціальний коефіцієнт (для демпфування коливань)

Передаточна функція ПІД-регулятора

$W_{PID} = \text{ctrl.tf}([K_d, K_p, K_i], [1, 0])$

Замкнена система: $W_{cl} = (W_{PID} * W_{sys}) / (1 + W_{PID} * W_{sys})$

$W_{cl} = \text{ctrl.feedback}(W_{PID} * W_{sys})$

Аналіз перехідної характеристики

$t, y = \text{ctrl.step_response}(W_{cl})$

```

# Побудова графіка
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(t, y, label="Перехідна характеристика", linewidth=2)
plt.xlabel("Час (с)")
plt.ylabel("Швидкість конвеєра")
plt.title("Перехідна характеристика стійкої системи")
plt.axhline(1, color='r', linestyle='--', label="Задана швидкість")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```

Розроблена програма дозволяє моделювати та аналізувати динаміку системи керування швидкістю конвеєрної лінії з використанням ПД-регулятора, забезпечуючи її стійкість та ефективність. Вона дозволяє швидко налаштовувати параметри регулятора для досягнення оптимальних характеристик системи, таких як швидке встановлення заданої швидкості, мінімізація коливань і усунення статичної помилки. Завдяки використанню бібліотеки control, програма легко адаптується під різні технічні вимоги та дозволяє експериментувати з параметрами передаточних функцій. Візуалізація перехідного процесу наочно демонструє поведінку системи, що полегшує аналіз її роботи. Крім того, код є модульним і може бути інтегрований у більш складні автоматизовані системи керування. Це дозволяє не тільки покращити стабільність і точність роботи конвеєра, але й підвищити продуктивність виробництва загалом.

Результатом роботи програми, представлена на рис. 4.3 у вигляді графіка перехідної характеристики, при умови що: $K_p = 5.0$, $K_i = 2.0$, $K_d = 1.5$, $\tau = 0.9$

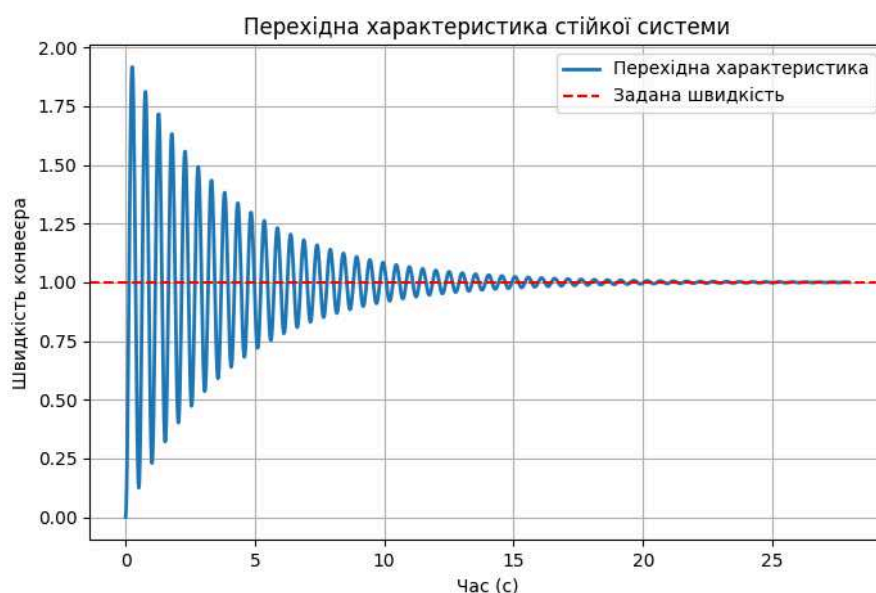


Рисунок 4.3 – Графік перехідної характеристики замкнутої системи автоматичного керування (САК) швидкістю конвеєрної лінії ($K_p = 5.0$, $K_i = 2.0$, $K_d = 1.5$, $\tau = 0.9$)

Результатом роботи програми, представлена на рис. 4.4 у вигляді графіка перехідної характеристики, при умови що: $K_p = 10.0$, $K_i = 3.0$, $K_d = 5$, $\tau = 0.9$.

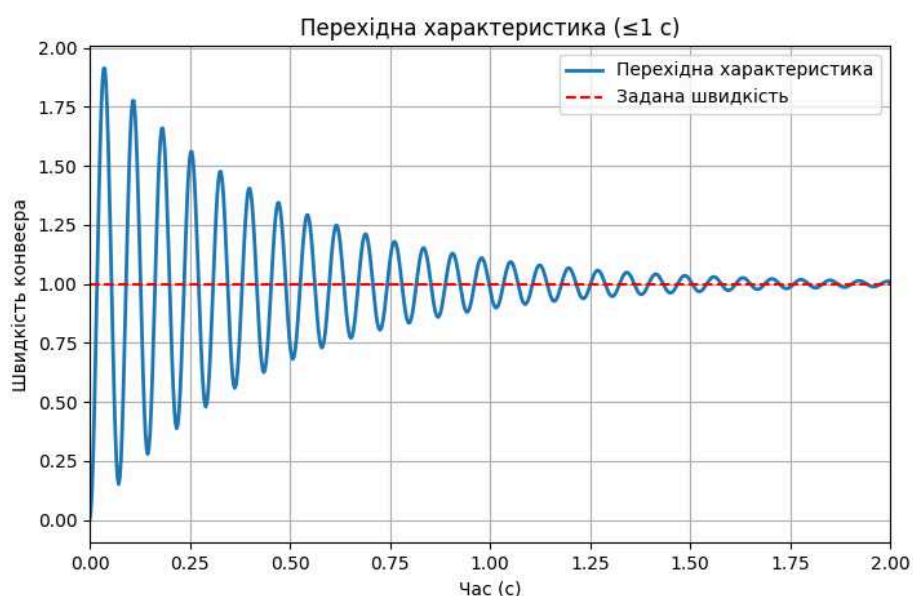


Рисунок 4.4 – Графік перехідної характеристики замкнутої системи автоматичного керування (САК) швидкістю конвеєрної лінії ($K_p = 10.0$, $K_i = 3.0$, $K_d = 5$, $\tau = 0.9$.)

Розроблені моделі для аналізу перехідної характеристики замкнутої системи автоматичного керування (САК) швидкістю конвеєрної лінії сортування фармацевтичної продукції дозволяють забезпечити високу точність, швидкодію та стійкість роботи системи. Використання ПІД-регулятора дає змогу мінімізувати відхилення від заданої швидкості та швидко компенсувати зовнішні збурення, що особливо важливо в умовах високих вимог до якості та надійності фармацевтичного виробництва. Передаточна функція системи враховує динаміку електродвигуна та механічні характеристики конвеєра, що дозволяє визначити оптимальні параметри регулятора. Аналіз отриманої перехідної характеристики показує, що правильний вибір коефіцієнтів K_i , K_p , K_d дозволяє досягти встановленого значення швидкості менш ніж за одну секунду, що відповідає вимогам до продуктивності сортувальної лінії. Завдяки підвищенню коефіцієнтів пропорційного та диференціального регулювання вдалося зменшити час регулювання та покращити якість перехідного процесу, уникнувши суттєвих перерегулювань і коливань. Модель дозволяє прогнозувати поведінку системи за різних умов експлуатації, а також коригувати налаштування ПІД-регулятора для досягнення оптимальної продуктивності. Використання методів автоматичного керування та моделювання в середовищі Python і PyCharm забезпечує ефективний інструмент для проектування та дослідження систем керування, що дозволяє значно скоротити витрати на експериментальні дослідження та забезпечити швидку інтеграцію в реальні виробничі процеси.

4.2 Розроблення методики проведення експерименту

В сучасних умовах фармацевтичного виробництва особливої уваги набуває розробка ефективних моделей та методів керування автоматичними роботизованими конвеєрними лініями, що забезпечують високу точність і надійність процесів. Одним із ключових аспектів цього завдання є створення макета конвеєрної лінії з системою автоматичного керування, яка здатна

оптимізувати сортування фармацевтичних продуктів. Успішна реалізація такої системи вимагає розробки потужних алгоритмів розпізнавання та ідентифікації упаковок, що дозволяє забезпечити високу швидкість і точність обробки даних. Важливим етапом є також проведення експериментальних досліджень для оцінки ефективності розробленої системи, що включає аналіз отриманих результатів ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії. Постановка задачі експерименту спрямована на чітке визначення цілей, завдань, методів та критеріїв оцінки, що дозволяє забезпечити структуроване і результативне дослідження. Такий комплексний підхід забезпечить інтеграцію новітніх технологій у виробничі процеси, підвищуючи загальну ефективність фармацевтичного виробництва та задовольняючи сучасні вимоги до автоматизації і роботизації.

Мета експерименту – проєктування та створення макету конвеєрної лінії з інтегрованою системою автоматичного керування для сортування фармацевтичних продуктів та розробка і тестування системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній конвеєрній лінії.

Завдання:

- дослідження обраних методів розпізнавання (розроблених моделей розпізнавання вторинної та третинної упаковок та QR-кодів);
- тестування розроблених алгоритмів обробки зображень та ідентифікації упаковок;
- інтеграція системи розпізнавання з системою автоматичного керування конвеєром;
- тестування точності системи ідентифікації за різних умов роботи;
- визначення ключових параметрів для експериментального дослідження;
- проведення серії тестових запусків конвеєрної лінії з різними параметрами;
- збір даних щодо успішності ідентифікації упаковок за різних умов;

– аналіз зібраних даних для виявлення основних факторів, що впливають на точність розпізнавання та ідентифікації;

– підготовка рекомендацій для оптимізації системи розпізнавання та ідентифікації.

Гіпотеза експерименту:

– передбачуване припущення щодо покращення часу зчитування даних з QR-кодів за умов часткового пошкодження при переміщені об'єктів на конвеєрній лінії сортування з обраною швидкістю (від 0.15 до 0.3 м/с), яке потрібно підтвердити або спростувати в ході експерименту.

План проведення експерименту представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – План проведення експерименту

№ етапу	Назва етапу	Опис етапу
1	Визначення ключових параметрів дослідження	Вибір основних параметрів, які будуть досліджуватись (швидкість конвеєра, типи упаковок, освітлення).
2	Підготовка обладнання та налаштування умов експерименту:	Налаштування конвеєрної лінії для проведення експериментів. Встановлення та калібрування засобів збору даних.
3	Проведення серії тестових запусків конвеєрної лінії	Виконання експериментів за різних умов роботи. Збір даних щодо точності та швидкості ідентифікації упаковок.
4	Аналіз зібраних даних	Обробка та аналіз зібраних даних для виявлення залежностей та аномалій. Визначення основних факторів, що впливають на ефективність ідентифікації.
5	Підготовка звіту та рекомендацій	Підготовка звіту з результатами експерименту. Розробка рекомендацій для оптимізації системи розпізнавання та ідентифікації.

Критерії оцінки результатів. Для проведення експерименту з розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній

конвеєрній лінії будуть використовуватися наступні критерії оцінки результатів.

Результати проведення першого експерименту при різних швидкостях конвеєрної лінії:

- точність розпізнавання упаковок, кількість успішно розпізнаних упаковок відносно загальної кількості упаковок, що пройшли через конвеєр;
- час розпізнавання, середній час, витрачений на розпізнавання кожної упаковки при різних швидкостях руху конвеєра;
- відсоток помилкових ідентифікацій, кількість помилкових ідентифікацій (хибнопозитивні та хибнонегативні результати) відносно загальної кількості спроб розпізнавання;
- продуктивність системи, загальна кількість упаковок, оброблених за одиницю часу при різних швидкостях конвеєра;

Результати, отримані при проведенні другого експерименту з різним світловим потоком (*lux*):

- точність розпізнавання при різних рівнях освітлення, відсоток успішно розпізнаних упаковок при різних рівнях освітлення (наприклад, 100 lux, 200 lux, 300 lux);
- час декодування QR-коду, середній час, необхідний для декодування QR-коду при різних рівнях освітлення;
- стійкість системи до змін освітлення, відсоток успішно розпізнаних упаковок при різких змінах освітлення під час роботи конвеєра;

Результати при зміні кута повернення зображення:

- точність розпізнавання при різних кутах повороту зображення, відсоток успішно розпізнаних упаковок при різних кутах нахилу (наприклад, 0°, 15°, 30°, 45°).
- час декодування QR-коду при різних кутах нахилу, середній час, витрачений на декодування QR-коду при різних кутах нахилу упаковки відносно камери;

– стійкість системи до кутових змін, відсоток успішних ідентифікацій при різних кутах нахилу, що демонструє здатність системи працювати з об'єктами, що розташовані під кутом;

Ці критерії дозволять оцінити ефективність та надійність системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній конвеєрній лінії при різних умовах роботи.

Очікувані результати та їх значення. Очікувані результати експерименту включають наступні аспекти, які визначатимуть ефективність та надійність розробленої системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній конвеєрній лінії, які наведені в табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Очікувані результати експерименту та їх значення

Параметр	Очікуваний результат	Значення
Висока точність розпізнавання упаковок при різних швидкостях конвеєра	Система зможе успішно розпізнавати більше 95% упаковок при різних швидкостях конвеєра, зберігаючи високу точність ідентифікації [125-127]	Висока точність розпізнавання забезпечить надійну роботу конвеєрної лінії, мінімізуючи помилки та підвищуючи ефективність виробничого процесу
Оптимальний час розпізнавання упаковок	Середній час розпізнавання та декодування QR-кодів залишатиметься в межах допустимих значень (наприклад, менше 0.5 с на упаковку) при різних умовах експлуатації.	Швидке розпізнавання упаковок дозволить підтримувати високий темп роботи конвеєра, що є критичним для досягнення високої продуктивності.
Стійкість системи до змін освітлення	Система забезпечить стабільну точність розпізнавання при різних рівнях освітлення (від 100 lux до 300 lux) та при різких змінах освітлення.	Здатність працювати при різних умовах освітлення підвищить універсальність та надійність системи в різних виробничих середовищах

Продовження таблиці 4.2

Параметр	Очікуваний результат	Значення
Стійкість системи до кутових змін об'єктів	Система зможе точно розпізнавати упаковки при різних кутах нахилу (до 45°), зберігаючи час декодування QR-кодів у межах прийнятних значень.	Стійкість до кутових змін дозволить системі ефективно працювати з упаковками, що можуть знаходитися під різними кутами під час руху конвеєром, забезпечуючи безперебійну роботу лінії.
Зниження кількості помилкових ідентифікацій	Відсоток помилкових ідентифікацій не перевищуватиме 2% за різних умов експлуатації	Низька кількість помилкових ідентифікацій підвищить загальну точність системи, зменшуючи кількість браку та необхідність ручного втручання.

Ці очікувані результати забезпечать високу ефективність, надійність розроблених моделей та методів системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній конвеєрній лінії, сприяючи підвищенню продуктивності та якості виробничого процесу

Можливі умови та параметри обмеження експерименту. Під час проведення експерименту з розробки та тестування системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на фармацевтичній сортувальній конвеєрній лінії можуть виникати певні обмеження, які потрібно врахувати. В табл. 4.3 наведені можливі умови та параметри обмеження проведення експерименту.

Таблиця 4.3 - Можливі умови та параметри обмеження експерименту

Параметр	Умова	Обмеження
1	2	3
Варіації швидкості конвеєра	Швидкість конвеєра може змінюватись у широкому діапазоні, що впливатиме на час розпізнавання та точність системи	Максимальна швидкість конвеєра, при якій система може стабільно розпізнавати упаковки, може бути обмеженою. Потрібно враховувати можливість зниження точності при дуже високих швидкостях.

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
Рівень освітлення	Освітлення у виробничому приміщенні може змінюватись протягом дня, а також залежати від розташування джерел світла	Система може мати обмеження щодо роботи при низькому або надто яскравому освітленні. Необхідно забезпечити оптимальні умови освітлення для коректної роботи системи.
Кут нахилу упаковок	Положення упаковок на конвеєрі може змінюватись, що впливатиме на кут, під яким камера зчитує зображення.	Система може бути обмежена у здатності розпізнавати упаковки, що повернуто під значними кутами (більше 45°). Це може вимагати додаткової стабілізації упаковок на конвеєрі.
Розміри та форма упаковок	Упаковки можуть мати різні розміри та форми, що може впливати на точність ідентифікації.	Система може мати обмеження щодо розпізнавання дуже дрібних або надто великих упаковок, а також упаковок нестандартної форми.
Типи та якість маркування	Якість друку та розташування QR-кодів або штрих-кодів на упаковках може змінюватись.	Погана якість друку або неправильне розташування кодів може ускладнити або зробити неможливим їх розпізнавання. Це потребуватиме встановлення стандартів якості маркування.
Зовнішні перешкоди та шуми	Виробниче середовище може містити зовнішні перешкоди, такі як вібрації, шуми або інші фактори, що можуть впливати на роботу камер та датчиків	Наявність зовнішніх перешкод може вимагати додаткових заходів для їх мінімізації, таких як ізоляція або фільтрація сигналів
Технічні обмеження обладнання	Використовуване обладнання може мати обмеження за технічними характеристиками (роздільна здатність камер, швидкодія процесорів тощо)	Технічні характеристики обладнання можуть обмежувати швидкість та точність системи розпізнавання. Це потребуватиме оптимізації програмного забезпечення та можливого оновлення обладнання.

Врахування цих умов та параметрів обмеження допоможе більш точно спланувати експеримент та розробити заходи для мінімізації їх впливу на результати дослідження.

4.3 Розроблення макета конвеєрної лінії системи автоматичного керування

Розробка макета системи автоматичного керування для фармацевтичної конвеєрної лінії сортування вимагає ретельного обґрунтування вибору технічних параметрів у зв'язку з особливостями галузі. При цьому в процесі розробки макету необхідно врахувати:

- стандарти та регулювання, вибрані технічні параметри відповідають усім застосовним стандартам та регулюванням у фармацевтичній галузі. Це включає вимоги до безпеки, чистоти виробництва, а також вимоги до трасування та контролю якості;

- вимоги до сортування, фармацевтичних продуктів. Це може включати різні форми упаковки, розміри, вагу та інші параметри, які можуть вплинути на вибір технічних рішень для ефективного сортування;

- фармацевтична промисловість вимагає високого стандарту чистоти та гігієнічності. Необхідно обирати технічні параметри, які забезпечують легкість очищення, дезінфекції та підтримання стерильності у процесі роботи;

- вимоги до швидкості та пропускної спроможності. Необхідно визначити потрібну швидкість сортування та пропускну здатність лінії відповідно до виробничих потреб. Враховуючи можливість масштабування системи для вищої продуктивності у майбутньому;

- системи трасування та контролю якості. Впровадження систем трасування продукції та контролю якості на кожному етапі сортування. Це важливо для забезпечення відповідності стандартам якості у фармацевтичній галузі;

– інтеграція з іншими системами. Сумісність та легкість інтеграції системи автоматичного керування з іншими виробничими системами, такими як системи пакування, маркування та складування;

– енергозбереження та стійкість. Технічні параметри, здатні забезпечити енергозбереження та зниження впливу на навколишнє середовище, що важливо для фармацевтичних компаній, що дотримуються принципів сталого розвитку [128].

Виходячи з проведеного аналізу вибору технічних параметрів, розроблено наступну схему промислової конвеєрної лінії для сортування фармацевтичних продуктів, яка представлена на рис. 4.5.

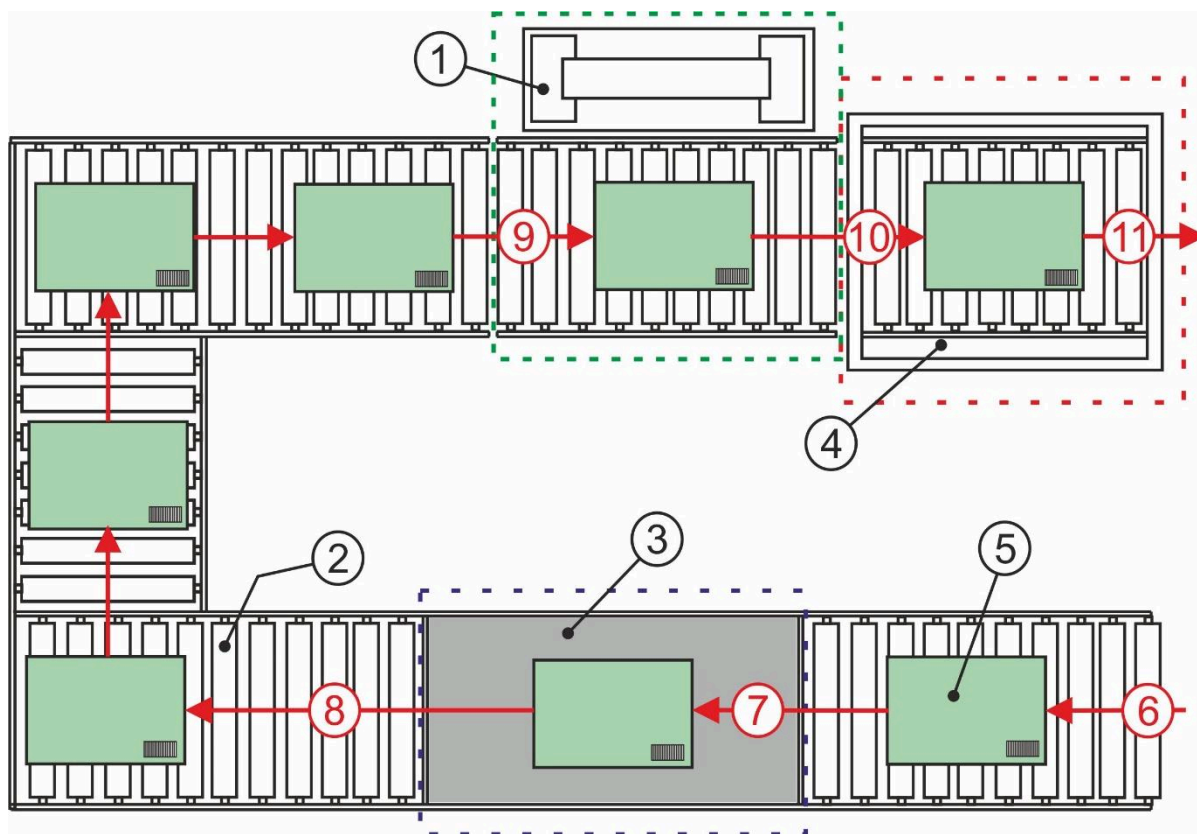


Рисунок 4.5 – Схема конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів

Зазначимо на схемі (рис. 4.5) такі основні елементи конвеєрної лінії:
1 – вертикальний ліфт для переміщення упаковок між поверхами, виконує роль виконавчого механізму для сортування ідентифікованих упаковок поверхах

транспортування; 2 – ролики, як елемент роликового конвеєра, служать для переміщення упаковки у просторі; 3 – зона конвеєра зі стрічковим елементом – столом, у цій зоні проводитиметься розпізнавання наявності та ідентифікація упаковки за допомогою системи комп'ютерного зору; 4 – вертикальний конвеєр на 3 поверсі для сортованих упаковок; 5 – упаковка на конвеєрній лінії. Також необхідно розглянути основні події, що діють на упаковку, для зручності рендерингу представимо у вигляді червоних стрілок; 6 – прихід неідентифікованого об'єкта на конвеєрну лінію із накопичувача; 7 – ідентифікація об'єкта за допомогою системи комп'ютерного зору; 8 – переміщення ідентифікованого об'єкта вздовж конвеєра; 9 – сортування ідентифікованого об'єкта за допомогою вертикального ліфта рівнями; 10, 11 – переміщення ідентифікованого об'єкта у сховище.

Включення вертикального ліфта до схеми промислової конвеєрної лінії для сортування фармацевтичних продуктів обґрунтовано кількома ключовими причинами:

- оптимізація простору. Вертикальні ліфти дозволяють ефективно використовувати вертикальний простір у виробничих приміщеннях. Це особливо важливо у випадку обмежених площ, де максимізація кожного квадратного метра має ключову роль. Вертикальні ліфти дозволяють ефективно транспортувати продукти між різними рівнями, зменшуючи потребу у великому горизонтальному просторі;

- збереження продукції. У фармацевтичній галузі безпека продукції є пріоритетом. Вертикальні ліфти забезпечують дбайливе переміщення продуктів між поверхами, що особливо важливо для крихких або чутливих до вібрацій фармацевтичної продукції. Це допомагає запобігати пошкодженню та зберігати високий стандарт якості продукції;

- сортування на різних рівнях. Вертикальні ліфти дозволяють організувати схему сортування на різних рівнях виробництва. Це може бути корисним, якщо фармацевтичні продукти вимагають різних етапів обробки чи сортування на різних поверхах конвеєрної лінії. Така структура скорочує

переміщення продукції вздовж горизонтального конвеєра, покращуючи ефективність та швидкість процесу;

– дотримання стандартів чистоти та гігієнічності. Вертикальні ліфти можуть бути легко вбудовані у системи чистоти та гігієнічності фармацевтичного виробництва. Вони забезпечують можливість швидкого доступу для технічного обслуговування та чищення, що відповідає суворим стандартам, встановленим у цій галузі.

– гнучкість у налаштуванні лінії. Вертикальні ліфти надають гнучкість у налаштуванні конвеєрної лінії для адаптації до різних виробничих потреб. Це дозволяє швидко вносити зміни в лінію сортування у разі зміни асортименту продукції або виробничих процесів.

Відповідно до розробленої схеми (рис. 4.5) промислової конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів проведемо вибір основних елементів.

Привідний роликівий конвеєр (призначений для автоматизованого транспортування продукту по своїй робочій поверхні. Загальний вигляд приводних зон в автоматизованій конвеєрній системі представлений на рис. 4.6.

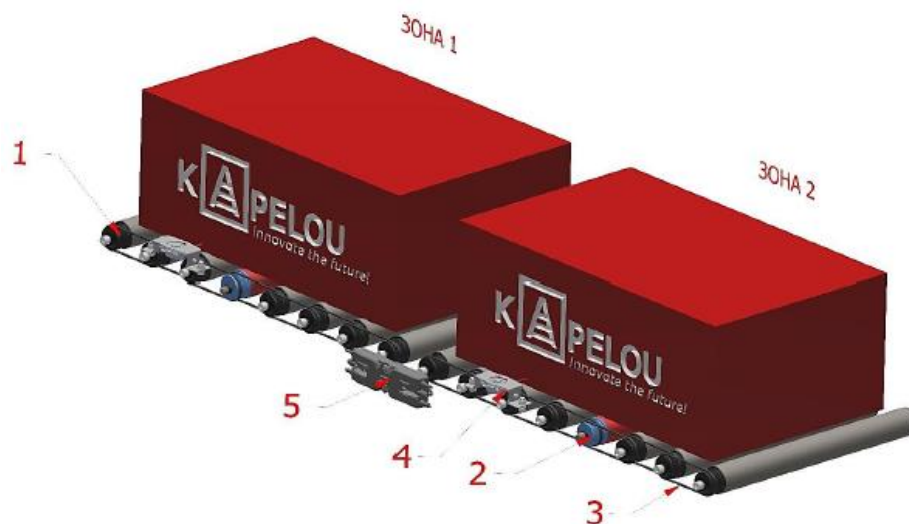


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд приводних зон в автоматизованій конвеєрній системі

Він складається з наступних елементів: набір провідних роликів (2) з електричним приводом та ведених роликів (1), з'єднаних синхронно-ремінними передачами (3). Контроль увімкнення приводних зон забезпечується сенсорами (4). Принцип роботи приводного накопичувального роликового конвеєра полягає в почерговому включенні/вимкненні приводних роликів на логічних зонах конвеєра за допомогою з'єднаних між собою плат керування (5), що представляють мережу для забезпечення обміну інформацією головний контролер системи. Основною особливістю накопичувального конвеєра є те, що працюють лише ті логічні зони, які зараз беруть участь у транспортуванні продукту. Зони, які не беруть участь у транспортуванні вантажу в даний момент, знаходяться в режимі очікування. Основні технічні параметри приводних зон (рис. 4.6) наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні технічні параметри приводних зон

Характеристика	Значення
Стандартна довжина конвеєрних зон (мм)	1000
Мінімальна довжина конвеєрних зон (мм)	800

Прямий приводний роликовий конвеєр є ефективним технічним рішенням для транспортування фармацевтичних продуктів. Він відрізняється простотою конструкції, високою надійністю та економічністю. Прямий привід усуває необхідність у складних механізмах та рухомих деталях, що знижує ризик поломок та полегшує обслуговування. Завдяки прямій передачі моменту від мотора до роликів, конвеєр забезпечує точне та плавне рух вантажів, а також ефективне використання енергії. Найменша кількість рухомих частин знижує рівень шуму, що важливо в умовах, де потрібне дотримання нормативів по шуму. Загальний вигляд прямого приводного роликового конвеєра модель 487 представлений рисунку 4.7, основні технічні характеристики наведено у табл. 4.5.



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд прямого приводного роликового конвеєра 487

Таблиця 4.5 – Основні технічні характеристики

Характеристика	Значення
Призначення	Транспортування продукту
Тип конвеєра	Накопичувальний
Вид конвеєра	Роликовий
Діапазон швидкостей роботи	від 0,5 до 1,0 м/с
Максимальне навантаження	35 кг/продукт
Нормальна ширина між профілями	487 мм
Сторона транспортування продукту	Коротка
Тип роликів	Циліндричний
Покриття роликів	Оцинкована сталь
Діаметр роликів	50 мм
Крок між роликами	100 мм
Тип ременів	2 PJ 336
Колір металевих конструкцій	Оцинкована сталь
Елемент керування двигунами зон	Контролер двозонний
Сенсори керування зонами	Оптичні

Прямий приводний роликовий конвеєр (рис. 4.7) призначений для автоматичного транспортування продукції своєю робочою поверхнею в

прямолінійному напрямку. Загальний вигляд прямого приводного роликового конвеєра модель 687 представлений рисунку 4.8, основні технічні характеристики у табл. 4.6.



Рисунок 4.8 – Загальний вигляд прямого приводного роликового конвеєра 687

Таблиця 4.6 – Основні технічні характеристики прямого приводного роликового конвеєра модель 687

Характеристика	Значення
1	2
Призначення	Транспортування продукту
Тип конвеєра	Накопичувальний
Вид конвеєра	Роликовий
Діапазон швидкостей роботи	від 0,5 до 1,0 м/с
Максимальне навантаження	35 кг/продукт
Нормальна ширина між профілями	687 мм
Сторона транспортування продукту	Коротка
Тип роликів	Циліндрична
Покриття роликів	Оцинкована сталь
Діаметр роликів	50 мм

Продовження таблиці 4.6

1	2
Крок між роликами	100 мм
Тип ременів	2 PJ 336
Колір металевих конструкцій	Оцинкована сталь
Елемент керування двигунами зон	Контролер двозоний
Сенсори керування зонами	Оптичні

Дивертер (або дивертер-клапан) у конвеєрній лінії є пристроєм, призначеним для направлення потоку матеріалів або продукції у певний напрямок на конвеєрі. Його основне призначення - поділ потоку на дві або більше частини для перенаправлення матеріалів у потрібне місце або іншу частину виробничого процесу. У рамках макету пропонується використовувати дивертер 900 моделі DU90-W36L38-2-SS, загальний вигляд дивертера представлений на рис. 4.9, а його технічні характеристики в табл. 4.7.



Рисунок 4.9 – Загальний вигляд дивертера 900 моделі DU90-W36L38-2-SS

Таблиця 4.7 – Основні технічні характеристики дивертера 900 моделі DU90-W36L38-2-SS

Характеристика	Значення
Призначення	сортування продукції
Тип конвеєра	підйомний
Вид конвеєра	стрічковий
Габаритні розміри, (Д х В х Ш)	430.6 x 385 x 168,3 мм
Швидкість роботи	макс. 1 м/с
Максимальне навантаження	2,5-30 кг
Модуль керування	контролер двозонний
Колір інших металевих елементів	оцинкована сталь
Кількість двигунів	2 шт.
Кількість стрічкових смуг	2 шт.
Конвеєрна база	487 мм
Кут скидання	90°
Колір корпусу	RAL 9005 (чорний)
Колір стрічок	RAL 5012 (блакитний)
Робоча поверхня	стрічка
Стрічка, (Д х Ш)	15 x 888 мм

Вертикальний конвеєр представляє собою підйомний механізм і статичний каркас із силовим приводом для переміщення підйомної каретки з прямою роликовою приводною секцією конвеєра по прямій каркасній напрямній за допомогою ремінної передачі. Призначений для вертикального переміщення та сортування продукції в конвеєрній системі. Технічні характеристики вертикального конвеєра представлені у табл. 4.8, загальний вигляд – на рисунку 4.10.

Таблиця 4.8 – Основні технічні характеристики вертикального конвеєра

Характеристика	Значення
Призначення	Вертикальне транспортування, сортування продукції
Вид конвеєра на каретці	Роликовий
Режим транспортування	1 продукт/цикл
Продуктивність	До 300 цикл/год.
Мінімальна можлива висота завантаження	+0,50 м
Максимальна вага продукту транспортування	До 35 кг
Тип передачі	Зубчастий ремінь
Двигун	NORD
Потужність двигуна	3,0 кВт
Колір двигуна	RAL 9006 (сірий)
Живлення	220...242 В(Δ) / 380...420 В(Y) 50 Гц



Рисунок 4.10 – Загальний вигляд вертикального конвеєра

Пряма роликова приводна секція на вертикальному конвеєрі відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного транспортування вантажів або матеріалів у вертикальному напрямку. Пряма приводна роликова секція на вертикальному конвеєрі переміщається за допомогою підйомної каретки, що з'єднується з приводом через ремінну передачу. Загальний вигляд прямо приводної роликової секції на вертикальному конвеєрі представлений на рис. 4.11, а його технічні характеристики – в табл. 4.9.

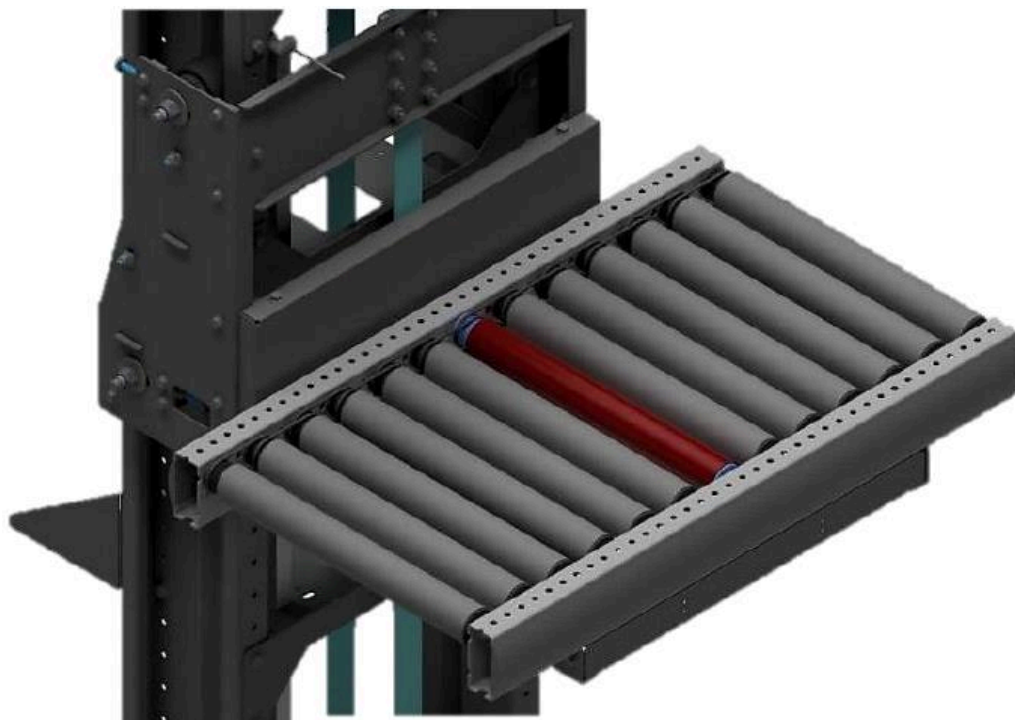
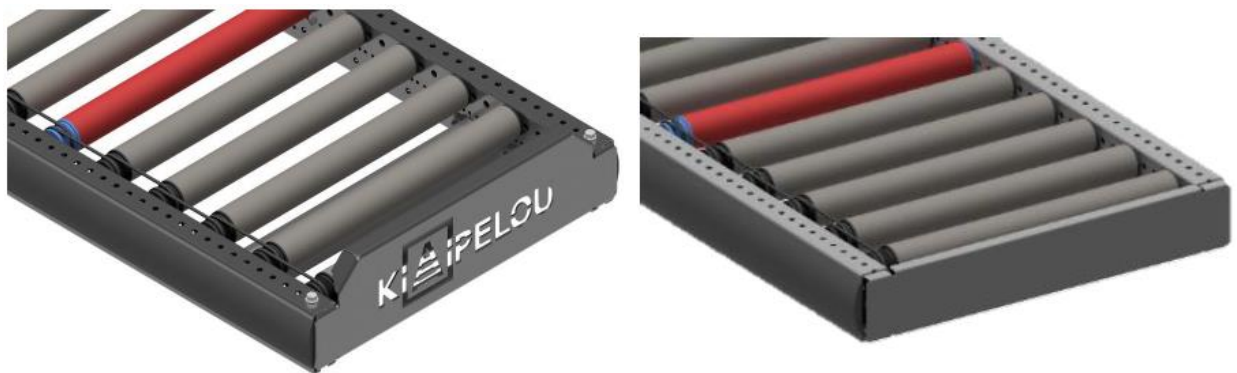


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд прямої приводної роликової секції на вертикальному конвеєрі.

Таблиця 4.9 – Основні технічні характеристики прямо приводної роликової секції на вертикальному конвеєрі

Характеристика	Значення
Призначення	Транспортування продукту
Вид конвеєра	Роликовий
Діапазон швидкостей роботи	Від 0,5 до 1,0 м/с
Нормальна ширина між профілями	487 мм
Сторона транспортування продукту	Коротка
Тип роликів	Циліндричний
Покриття роликів	ПВХ
Діаметр роликів	50 мм
Крок між роликами	75 мм
Тип ременів	2 PJ 286
Колір металевих конструкцій	Оцинкована сталь
Елемент керування	Контролер Eqube
Сенсори керування зонами	Оптичні

Стопові та стартові пластини в роликовому конвеєрі призначені для забезпечення безпеки та ефективності роботи системи транспортування матеріалів. Стопові пластини запобігають відкочуванням вантажів і забезпечують контрольовану зону зупинки, що важливо для безпечного обслуговування та завантаження матеріалів. Стартові пластини контролюють початок руху вантажів, запобігаючи різким стартам і підвищуючи ефективність завантаження та вивантаження. Обидва елементи сприяють дотриманню стандартів безпеки та збільшенню довговічності обладнання конвеєра. Загальний вигляд стопових та стартових пластин представлений на рис. 4.12.



а)

б)

а) стопова пластина; б) стартова пластина

Рисунок 4.12 – Загальний вигляд стопової та стартової пластини для роликового конвеєра

Стопова пластина (рис. 4.12, а) використовується для запобігання падінню продукції транспортування на глухих кінцях привідного або непривідного роликового конвеєра. Покриття стопової пластини – оцинкована сталь.

Стартова пластина (рис. 4.12, б) встановлюється в місцях завантаження продукту на конвеєр і використовується для захисту людини від пошкодження одягу через рухомі частини конвеєра та запобігання удару роликів при

встановленні продукції транспортування від початку лінії. Покриття стартової пластини – оцинкована сталь.

Після аналізу та вибору основних робочих елементів для конвеєрних ліній сортування фармацевтичних продуктів, можна приступити до розробки системи автоматичного керування. На першому етапі розробимо структурну схему керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичних продуктів, яка представлена на рис. 4.13.

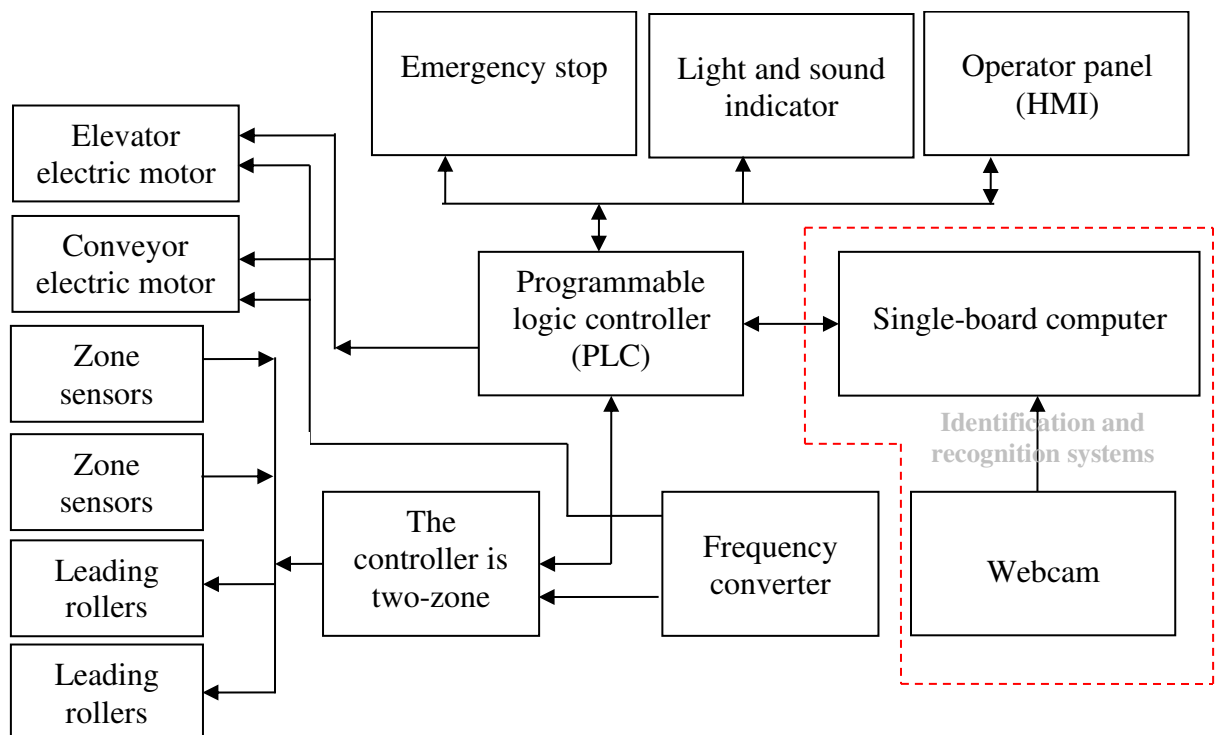


Рисунок 4.13 – Схема керування конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів

У схемі керування конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів такі елементи виконують ключові функції:

- Elevator Electric Motor (електродвигун підйомника) відповідає за вертикальне переміщення вантажів конвеєром, забезпечуючи ефективне сортування на різні рівні;
- Conveyor Electric Motor (електродвигун конвеєра) відповідає за рух конвеєрної стрічки, переміщуючи вантажі по лінії сортування;

- Zone Sensors (зонні датчики) використовуються для визначення наявності або відсутності вантажів у різних зонах конвеєра. Ці відомості можуть використовуватись для активації інших елементів системи;
- Leading Rollers (ведучі ролики) забезпечують стабільний рух вантажів конвеєрною стрічкою і допомагають контролювати їх положення;
- The controller is two-zone (контролер двозонний) здійснює керування всією системою, включаючи координацію руху конвеєра, активацію сортувальних зон та взаємодію з іншими керуючими елементами;
- Frequency Converter (частотний перетворювач) регулює швидкість роботи електродвигунів, забезпечуючи гнучкість в керуванні конвеєром та адаптацію до різних умов;
- Program Logic Controller (програмований логічний контролер) управляє логікою роботи всієї системи, забезпечуючи координацію між різними елементами, ґрунтуючись на заздалегідь заданих програмних правилах;
- Emergency Stop (аварійне відключення) надає механізм для миттєвого зупинення конвеєра у разі надзвичайних ситуацій чи необхідності безпечного припинення роботи;
- Light and Sound Indicator (індикатор світла та звуку) використовується для візуального та звукового оповіщення оператора про стан системи, можливі проблеми або події, що потребують уваги;
- Operator Panel (панель оператора, HMI – Human-Machine Interface) надає оператору можливість взаємодії із системою, відображає інформацію про роботу конвеєра, дозволяє налаштовувати параметри та реагувати на події;
- Single-board computer (одноплатний комп'ютер) є центральним керуючим пристроєм, що виконує обробку даних та керування всією системою конвеєра. Він може обробляти інформацію від датчиків, приймати рішення на основі програмних алгоритмів та взаємодіяти з іншими елементами керування;
- Webcam служить для візуального моніторингу процесу сортування. Вона може бути використана для захоплення зображень продуктів, їх аналізу

за допомогою комп'ютерного зору або візуального контролю якості. Веб-камера також може бути залучена для ідентифікації продуктів за їх зовнішнім виглядом.

Проведемо аналіз та вибір апаратних модулів для реалізації макета системи автоматичного керування конвеєрною лінією сортування фармацевтичних продуктів, на базі розробленої схеми (рис. 4.9). На першому етапі проведемо вибір Program Logic Controller (PLC), в ході аналізу технічних характеристик і вимог до системи керування конвеєрної лінії сортування, що розробляється, було запропоновано використовувати наступні PLC, загальний вигляд яких представлено на рис. 4.14, а порівняння їх базових характеристик наведено в табл. 4.10.



а) PLC Siemens s7-1200; б) MELSEC iQ-F; в) CompactLogix 5370

Рисунок 4.14 – Загальний вигляд обраних PLC.

Таблиця 4.10 – Порівняння основних технічних характеристик PLC Siemens s7-1200, MELSEC iQ-F, CompactLogix 5370.

Характеристика	PLC		
	Siemens s7-1200	MELSEC iQ-F	CompactLogix 5370
1	2	3	4
Виробник	Siemens	Mitsubishi Electric	Rockwell Automation
Тип	Мікроконтролерний	Мікроконтролерний	Мікроконтролерний

Продовження таблиці 4.10

1	2	3	4
Кількість дискретних входів	32 - 256	8 - 128	16 - 256
Кількість дискретних виходів	24 - 256	8 - 128	16 - 256
Кількість аналогових входів	8 - 32	8 - 32	8 - 32
Кількість аналогових виходів	4 - 16	4 - 16	4 - 16
Максимальна частота дискретних входів	100 кГц	100 кГц	100 кГц
Максимальна частота дискретних виходів	100 кГц	100 кГц	100 кГц
Максимальна частота аналогових входів	100 кГц	100 кГц	100 кГц
Максимальна частота аналогових виходів	100 кГц	100 кГц	100 кГц
Максимальна пам'ять програм	128 кБ - 1 МБ	128 кБ - 1 МБ	128 кБ - 1 МБ
Максимальна пам'ять даних	128 кБ - 1 МБ	128 кБ - 1 МБ	128 кБ - 1 МБ
Робоча температура	-25 °C - 60 °C	-25 °C - 60 °C	-25 °C - 60 °C
Вологозахист	IP65	IP65	IP65

Для реалізації макету системи автоматичного керування конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів було обрано PLC Siemens s7-1200. Цей вибір був зроблений на підставі порівняння технічних характеристик трьох аналізованих PLC: Siemens s7-1200, MELSEC iQ-F і CompactLogix 5370. Всі

три PLC мають широкий діапазон входів і виходів, що дозволяє підключати до них різні датчики та виконавчі пристрої, необхідні для роботи конвеєрної лінії. Siemens s7-1200 пропонує більш широкий діапазон входів і виходів, ніж MELSEC iQ-F та CompactLogix 5370. Це дозволяє підключати до нього більшу кількість датчиків та виконавчих пристроїв, що може бути необхідним у разі складної конвеєрної лінії. PLC підтримують високу частоту дискретних та аналогових сигналів, що забезпечує високу точність та швидкість роботи системи. Siemens s7-1200 підтримує більш високу частоту аналогових сигналів, ніж MELSEC iQ-F та CompactLogix 5370. Це може бути важливим для конвеєрних ліній, що вимагають високої точності керування. Для реалізації складних алгоритмів керування конвеєрною лінією потрібен великий обсяг пам'яті програм та даних. Siemens s7-1200 має великий обсяг пам'яті програм та даних, що дозволяє створювати складні алгоритми керування. MELSEC iQ-F та CompactLogix 5370 також мають великий обсяг пам'яті програм та даних, але менший, ніж Siemens s7-1200.

На підставі порівняння технічних характеристик трьох аналізованих PLC можна зробити висновок, що PLC Siemens s7-1200 є оптимальним вибором для реалізації макета системи автоматичного керування конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів. Цей PLC має широкий діапазон входів та виходів, високу частоту дискретних та аналогових сигналів, великий обсяг пам'яті програм та даних, широкий діапазон робочих температур та ступінь захисту від вологи та пилу, а також ширший діапазон цін, ніж конкуренти.

Проведемо аналіз та вибір контролера двозонного, в ході огляду технічних характеристик були обрані наступні двозонні контролери: ConveyLinx Ai2, ConveyLinx Dual Zone, ConveyLinx Ai3, загальний вигляд яких представлені на рис. 4.15, а порівняння їх технічних характеристик у табл. 4.11.



а)

б)

в)

а) ConveyLinX Ai2; б) ConveyLinX Dual Zone; в) ConveyLinX Ai3

Рисунок 4.15 – Загальний вигляд двозонних контролерів

Таблиця 4.11 – Порівняння основних технічних характеристик ConveyLinX Ai2, ConveyLinX Dual Zone, ConveyLinX Ai3.

Характеристика	Контролери двозонні		
	ConveyLinX Ai2	ConveyLinX Dual Zone	ConveyLinX Ai3
Діапазон регулювання швидкості	від 0 до 100%	від 0 до 100%	від 0 до 100%
Дозвіл регулювання швидкості	0,10%	0,10%	0,10%
Максимальне значення прискорення	10 м/с ²	10 м/с ²	10 м/с ²
Максимальне значення уповільнення	10 м/с ²	10 м/с ²	10 м/с ²
Діапазон входних сигналів	0-10 В, 4-20 мА, дискретні сигнали	0-10 В, 4-20 мА, дискретні сигнали	0-10 В, 4-20 мА, дискретні сигнали
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP65	IP67	IP65

ConveyLinX Dual Zone також відповідає всім вимогам, але має більш високу ціну (від 1500\$). ConveyLinX Ai3 має ширший діапазон входних сигналів (додані сигнали HART та CANopen), але при цьому має нижчий ступінь захисту від вологи та пилу (IP65). Таким чином, ConveyLinX Ai2 є оптимальним вибором для реалізації макета системи автоматичного керування

конвеєрною лінією сортування фармацевтичних продуктів. Він має всі необхідні технічні характеристики та прийнятну ціну.

Для економії енергоресурсів та можливості регулювання швидкості такими механізмами як вертикальний конвеєр використано перетворювач частоти SIEMENS G120 PM240-2 (рис. 4.16). Перетворювачем частоти є такий електронний пристрій, що призначений змінювати частоту електричного струму (напруги). Використовуючи метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) такий пристрій перетворює вхідну синусоїдальну напругу з фіксованою частотою й амплітудою в вихідну імпульсну напругу із змінною частотою та амплітудою. Якщо доволі плавно збільшувати амплітуду напруги та частоту, які подають на обмотки статора асинхронного електродвигуна, тоді можливою стає реалізація плавного регулювання швидкості обертання його валу.



Рисунок 4.16 – Перетворювач частоти SIEMENS G120 PM240-2

Основні технічні характеристики перетворювача частоти SIEMENS G120 PM240-2 представлені в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Основні технічні характеристики перетворювача частоти SIEMENS G120 PM240-2

Характеристика	Значення
Напруга живлення	Трифазне виконання
Потужність	До 4 кВт
Частота живлення	47...63Гц
Вихідна частота	0-200 Гц
Перевантаження на момент	150% протягом 1 хвилини
Клас захисту	IP20
Діапазон робочих температур	-5 ... +40 °C
Відносна вологість	До 95%, без появи конденсату

Панель оператора призначена для відображення інформації про стан системи, керування та обробку аварійних ситуацій. Панель оператора також дозволяє змінювати налаштування системи кваліфікованим персоналом постачальника системи під час сервісного та/або гарантійного обслуговування обладнання [129-131]. Загальний вигляд обраної панелі оператора Siemens SIMATIC HMI представлено рисунку 4.17, а основні технічні характеристики у табл. 4.13.

Конвеєрна система працює в повністю автоматичному режимі і вимагає втручання людини лише у разі аварійних та позаштатних ситуацій [132]. Внаслідок чого необхідно внести до складу конвеєрної системи пристрої сигналізації та керування, розташовані на щитах і вздовж конвеєрної лінії.



Рисунок 4.17 – Загальний вигляд вибраної панелі оператора Siemens
SIMATIC HMI

Таблиця 4.13 – основні технічні характеристики панелі оператора
Siemens SIMATIC HMI

Характеристика	Значення
Номінальна напруга живлення	24В постійного струму
Мережа	Profinet
Вбудований інтерфейс	USB-Host
Конфігуруючі мови	32
Наявність векторної графіки	так
Кількість кольорів	65536
Архівування даних	USB Stick
Клас захисту	IP20
Діапазон робочих температур	-20 ... 60 °C
Відносна вологість	10...90 %, без появи конденсату

Світлозвукові індикатори розміщуються на кожному поверсі вертикального конвеєра та вздовж конвеєрної лінії таким чином, щоб забезпечити звукове та світлове сповіщення всього персоналу, задіяного у роботі з конвеєрною системою. Також необхідно реалізувати аварійну зупинку

системи якщо буде безпосередня загроза життю та здоров'ю людини, оскільки її спрацювання веде до миттєвої зупинки системи.

Під час аварійної ситуації на конвеєрній лінії потрібно натиснути будь-яку кнопку зупинки «Аварійний стоп». Кнопки Аварійний стоп розташовані на кнопкових постах жовтого кольору вздовж конвеєрної лінії та на щиті керування ЩК. Загальний вигляд світлозвукового індикатора та кнопки аварійної зупинки «Аварійний стоп» представлено на рис. 4.18.



а) світлозвуковий індикатор; б) кнопка аварійної зупинки «Аварійний стоп»

Рисунок 4.18 – Загальний вигляд світлозвукового індикатора та кнопки аварійної зупинки «Аварійний стоп»

Виходячи з обраного обладнання представленого на рисунках та схеми конвеєрної лінії сортування фармацевтичних продуктів (рис. 4.5) було розроблено наступний план розміщення конвеєрних секцій, який представлений на рис. 4.19.

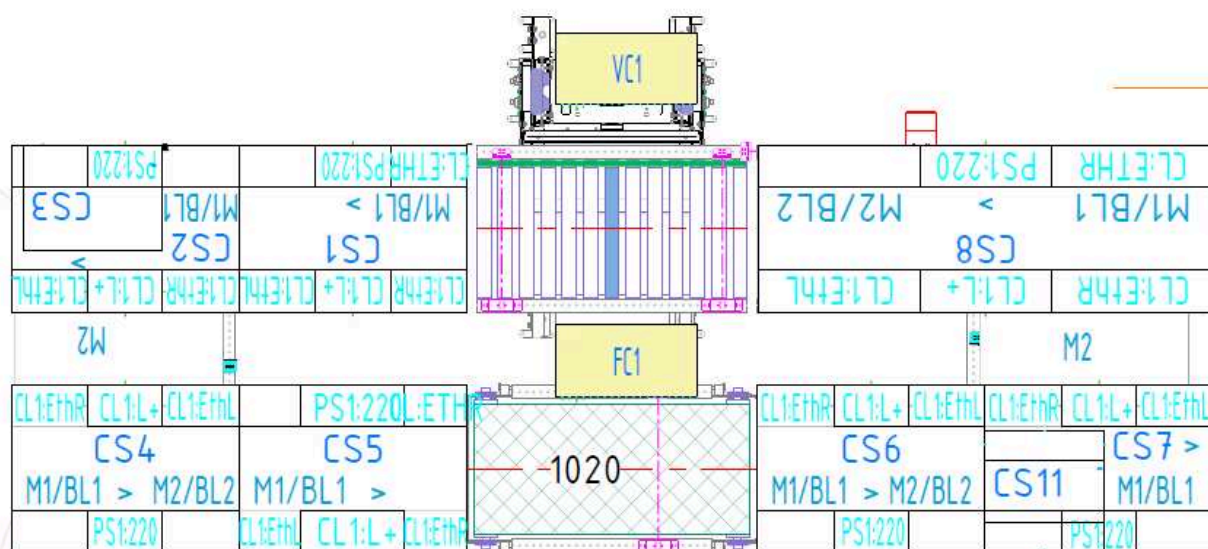


Рисунок 4.19 – План розміщення конвеєрних секцій

Грунтуючись на технічних характеристиках та специфікаціях обраних апаратних модулів для реалізації макета системи автоматичного керування для фармацевтичної конвеєрної лінії сортування, була розроблена схема функціонального підключення конвеєрних секцій, яка представлена на рис. 4.20.

Схема електричного підключення PLC Siemens s7-1200 представлена на рис. 4.21.

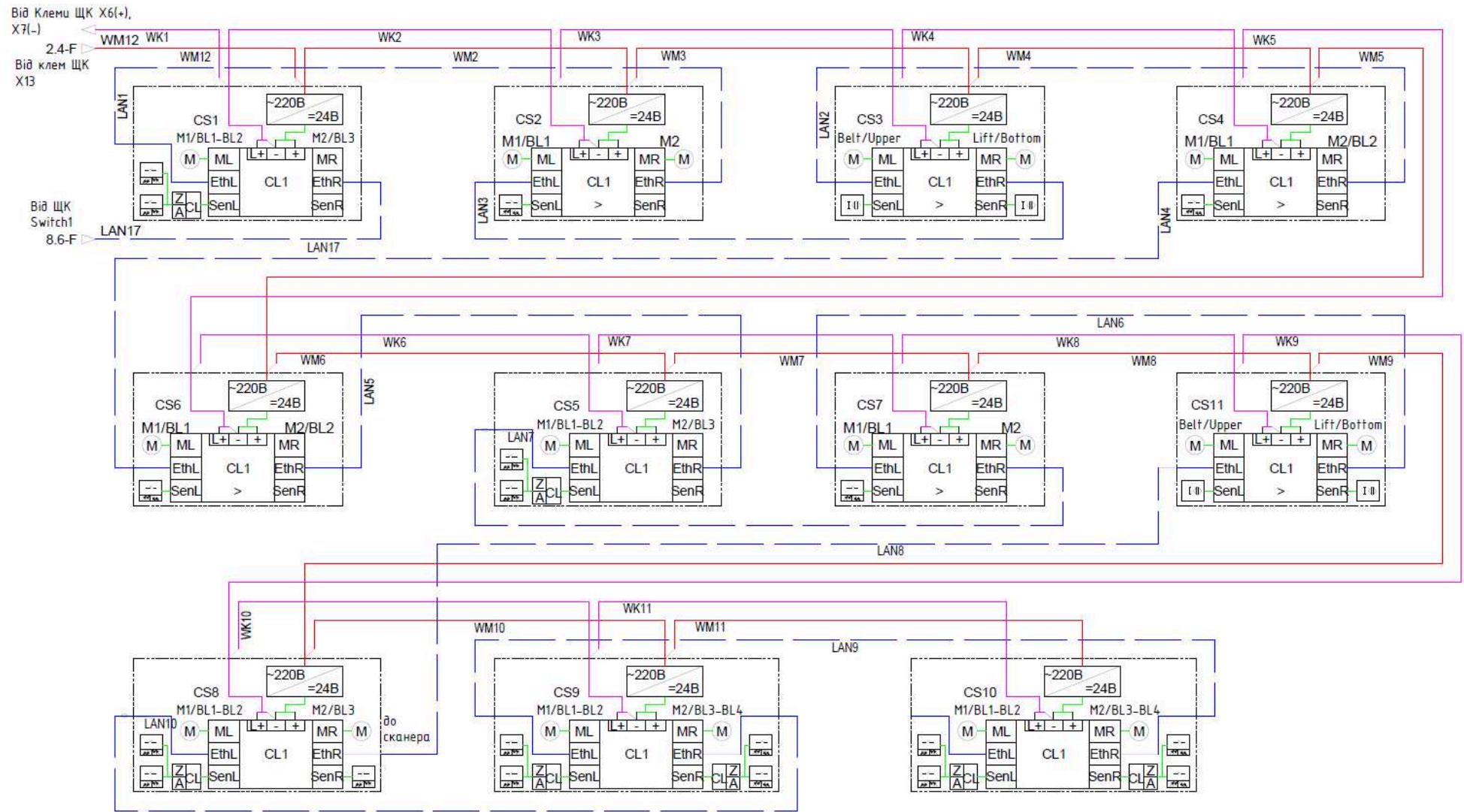


Рисунок 4.20 – Схема функціонального підключення конвеєрних секцій

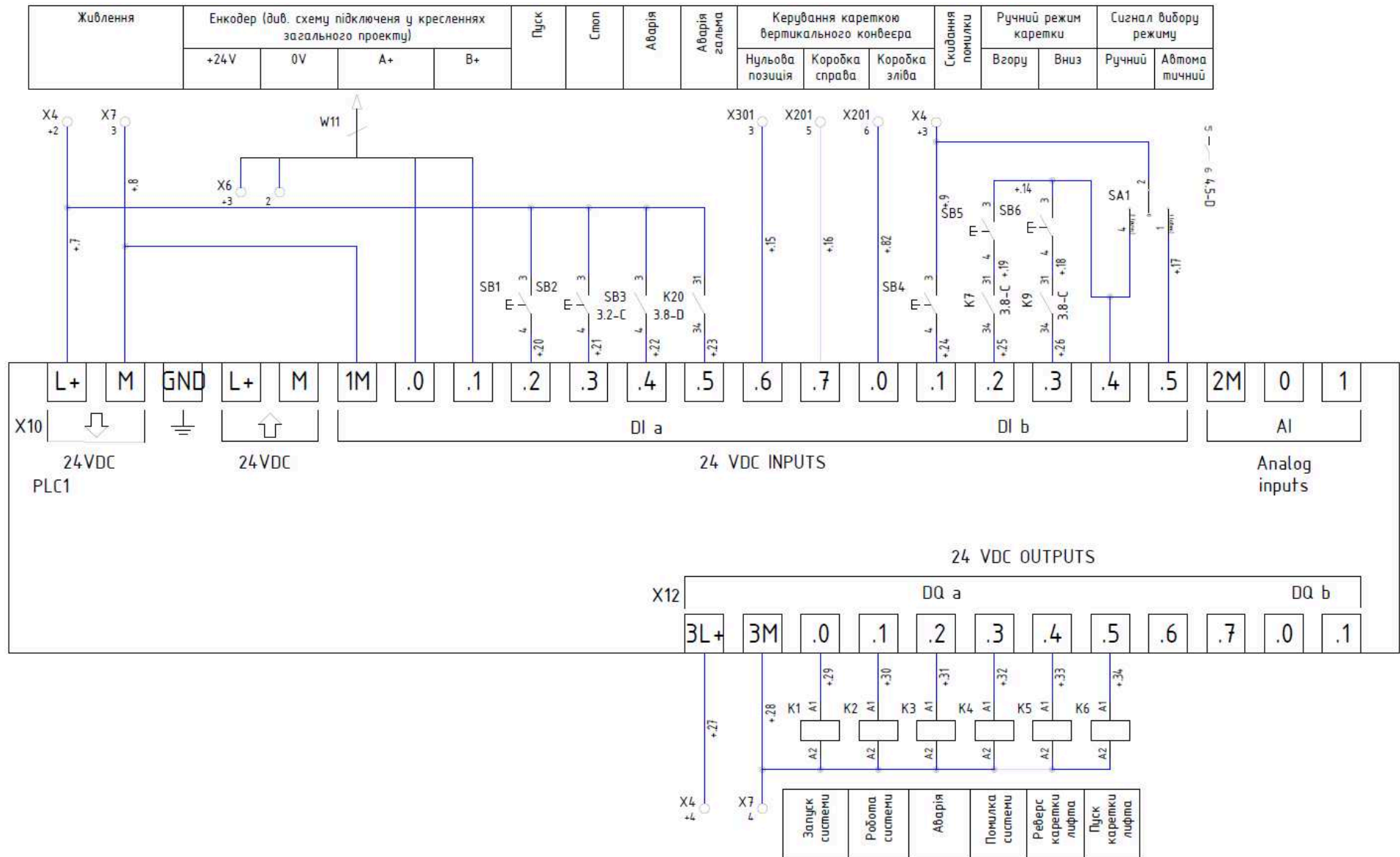


Рисунок 4.21 – Схема електричного підключення PLC Siemens s7-1200

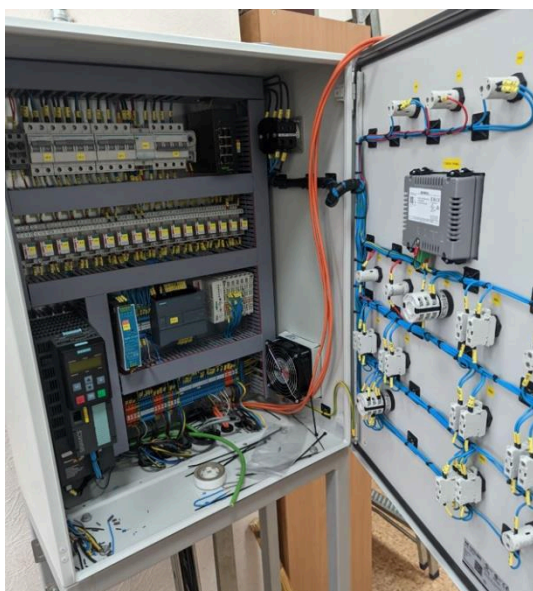
На базі проведеної роботи було зібрано макет фармацевтичної конвеєрної лінії для сортування реалізований на системі керування PLC Siemens s7-1200 [133]. Загальний вигляд макета представлений рисунку 4.22.



а)



б)



в)



г)

а) загальний вигляд макета; б) вид ярусів для сортування;
в) система керування конвеєром; г) вертикальний ліфт у загальній системі конвеєра.

Рисунок 4.22 – Загальний вигляд макета фармацевтичної конвеєрної лінії для сортування

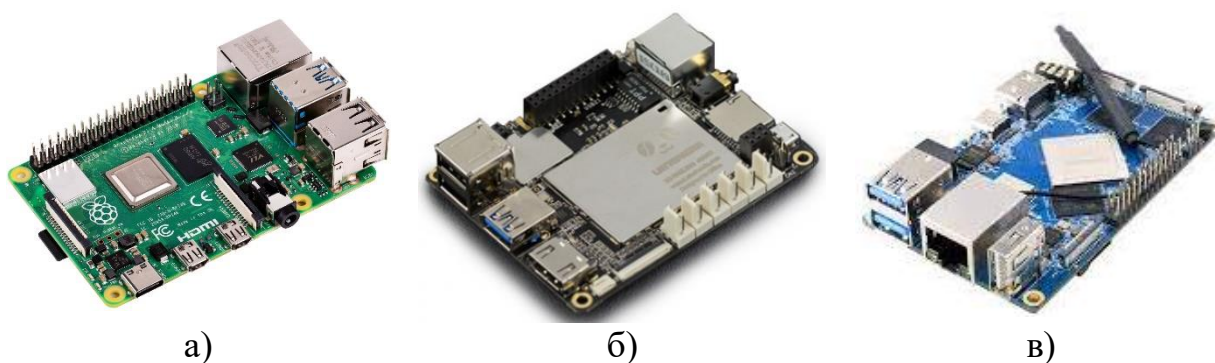
4.4 Розроблення системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції

Базуючись на технічних особливостях промислової лінії сортування

упаковок з вертикальним ліфтом фірми Karelou, можна перейти до вибору апаратних модулів для реалізації системи комп'ютерного зору для ідентифікації об'єктів. Для спрощення вибору модулів введемо деякі обмеження:

- невеликі габаритні розміри;
- підтримка бездротових технологій передавання даних (Wi-Fi, Bluetooth);
- інтерфейс введення\виведення загального призначення, для підключення та керування виконавчими пристроями (вертикальним ліфтом);
- підтримка підключення Web-камери.

Виходячи із вище перерахованих обмежень для реалізації системи комп'ютерного зору для ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії можна використовувати наступні одноплатні комп'ютери, які представлені на рис. 4.23, порівняння їхніх технічних характеристик наведено в табл. 4.14.



а) Raspberry Pi 4 Model B [134];

б) LattePanda 4GB/64GB [135];

в) Orange Pi 4 4Гб DDR4/16Гб EMMC [136].

Рисунок 4.23 – Одноплатні комп'ютери для реалізації ідентифікації об'єктів

Таблиця 4.14 – Технічні характеристики одноплатних комп’ютерів для реалізації системи ідентифікації об’єктів

Параметри	Одноплатні комп’ютери		
	Raspberry Pi 4 Model B	LattePanda 4GB/64GB	Orange Pi 4 4Гб DDR4/16Гб EMMC
Процесор	BROADCOM BCM2711	Intel Cherry Trail Z8350 Quad Core	Rockchip RK3399
Кількість ядер процесора	4	4	4
Частота процесора	1.5 GHz	1.8GHz	2 GHz
RAM	8 GB	4 GB	4 GB
Графічний контролер	VideoCore VI c OpenGL ES 1.1, 2.0, 3.0	Intel HD Graphics	Mali-T864 GPU з підтримкою OpenGL
Мережеві можливості	Ethernet 10/100/1000 WiFi 2.4G/5.8G 300 mb/s	Ethernet 10/100/1000 WiFi 2.4G/5.8G 300 mb/s	Ethernet 10/100/1000 WiFi 2.4G/5.8G 300 mb/s
Інтерфейси	4 USB	3 USB	2 USB
Живлення	5V 3A	5V 2A	5V 3A
General-purpose input/output (GPIO)	+	для чіпу Intel X-Z8300 и для ATmega32u4	+
Сховище eMMC	microSD	Вбудована пам’ять 64GB + microSD	Вбудована пам’ять 16GB + microSD
Operating System	Raspberry Pi OS, Debian Linux	Windows 10, 64-бітна	Raspberry Pi OS, Debian Linux
Габаритні розміри (mm)	88*58	80*70	91*55.7
Ціна	~120\$	~ 150 – 219\$	~ 110\$

Як можна бачити з табл. 4.11, всі одноплатні комп’ютери мають схожі параметри та ціни, але необхідно зазначити деякі особливості. LattePanda

4GB/64GB побудовано на базі процесора Intel Cherry Trail Z8350 Quad Core, що є мікропроцесорною системою, на відміну від Orange Pi 4 4Гб DDR4/16Гб і Raspberry Pi 4 Model B. Внаслідок цього, на LattePanda 4GB/64GB ускладнюється принцип роботи із шиною GPIO при розробці систем керування на мові Python. Отже, виходячи з того, що Raspberry Pi 4 Model B має більший обсяг пам'яті в два рази, ніж Orange Pi 4 4Гб DDR4/16Гб, в якості апаратного модуля для розробки системи комп'ютерного зору для ідентифікації об'єктів на конвеєрній стрічці для сортування обрано Raspberry Pi 4 Model B [137]. Для отримання відеозображення в межах даного дослідження використано Web-камеру Logitech C310 HD (модель 960-001065) або Raspberry Pi Cam v1.3.

Наступним кроком розроблено структурну схему взаємодії програмних і апаратних модулів на базі Raspberry Pi 4 Model B, яку подано на рис. 4.24.

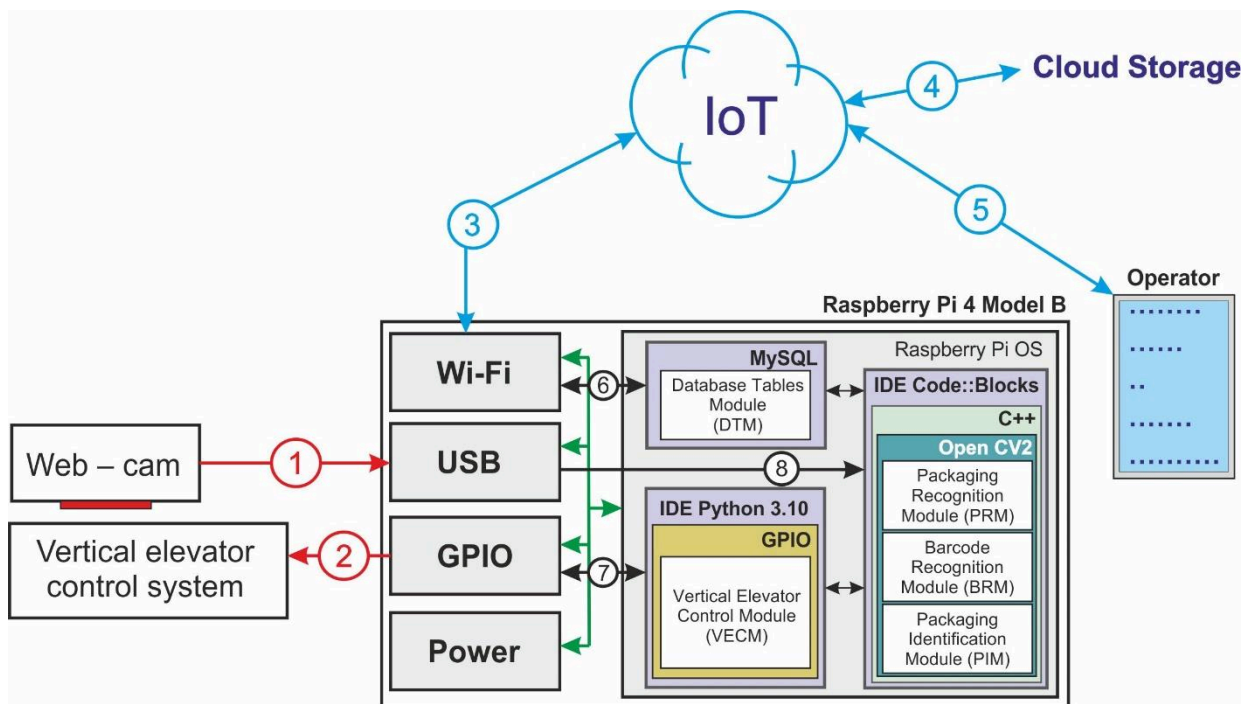


Рисунок 4.24 – Структурна схема взаємодії програмних і апаратних модулів

Опишемо призначення основних елементів структурної схеми взаємодії програмних і апаратних модулів в розроблюваній системі ідентифікації об'єктів на промисловій конвеєрній лінії:

– Web-cam – камера, яку встановлено безпосередньо над зоною конвеєра

із стрічковим столом, в якості камери пропонується взяти або вбудовану камера Raspberry Pi Cam v1.3 або виносну камера Web-cam Logitech C310 HD (модель 960-001065), яка підмикається через роз'єм USB;

- Vertical Elevator Control System – система керування вертикальним ліфтом, буде керуватися за допомогою подавання керуючого сигналу через інтерфейс GPIO з Raspberry Pi 4 Model B;

- Power – модуль живлення (блок живлення) одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4 Model B (DC 5V,3A);

- Wi-Fi – апаратний модуль, інтегрований в Raspberry Pi 4 Model B, в даному випадку використовується для передавання\отримання даних з Raspberry Pi 4 Model B із зовнішніх пристроїв зберігання (Cloud Storage), а також для взаємодії із оператором за допомогою технології IoT;

- Raspberry Pi OS – графічна операційна система для керування Raspberry Pi 4 Model B, вона побудована на базі Debian, сім'ї OS Linux;

- IDE Code::Blocks – кросплатформене середовище розробки програмного забезпечення на базі бібліотеки wxWidgets;

- C++ – об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня, грає роль основної мови для розробки системи ідентифікації об'єктів на промисловій конвеєрній лінії;

- Open CV2 – бібліотека комп'ютерного зору з відкритим програмним кодом, для обробки зображення та чисельних алгоритмів загального призначення;

- Packaging Recognition Module (PRM) – модуль розпізнавання наявності упаковки, на конвеєрній лінії, дозволяє знайти контур упаковки, для виділення її кордонів й ідентифікації її наявності;

- Barcode Recognition Module (BRM) – на отриманому зображенні упаковки локалізує місце знаходження штрих-коду;

- Packaging Identification Module (PIM) – виконує читання даних, отриманих із штрих-коду та ідентифікує об'єкт на конвеєрній лінії;

- IDE Python 3.10 – середовище розробки програмного забезпечення для

об'єктно-орієнтованої мови програмування високого рівня Python;

- GPIO – спеціальна бібліотека (PRi.GPIO), яка дає можливість керувати зовнішніми (система керування вертикальним ліфтом) пристроями через написання керуючих команд на мові Python;

- Vertical Elevator Control Module – програма для передавання командних сигналів системі керування вертикальним ліфтом через інтерфейс GPIO, що дозволяє виконувати сортування об'єктів за 3 рівнями;

- MySQL – система керування реляційними базами даних, на базі якої зберігається інформація про об'єкти ідентифікації, специфікації та необхідна інформація;

- Database Tables Module – таблиці з даними про об'єкти сортування та необхідну інформацію для складування.

Загальний вигляд макета системи комп'ютерного зору промислової конвеєрної лінії для сортування упаковок з вертикальним ліфтом фірми Karelou в корпусі представлено на рис. 4.21.



Рисунок 4.25 – Макет системи комп'ютерного зору

4.5 Розроблення програми автоматичного керування для системи розпізнавання та ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції

Беремо до уваги особливості розробки програмного забезпечення для Raspberry Pi 4 Model B та вимоги до технічного завдання, а також обмеження, які пов'язані з особливостями керування виконавчим механізмом. В межах реалізації поставлених завдань в даному дослідженні для керування розробленою системою комп'ютерного зору для ідентифікації об'єктів, було розроблено узагальнений алгоритм, який представлено на рис. 4.26.

Передусім отримуємо кадр (frame) зображення або з камери, або з відео потоку. Щоб виділити та видалити зайві елементи, а також визначити контури об'єктів, отриманий кадр має бути оброблений. Виходячи із завдання, об'єкти, що мають бути ідентифікованими, є спільного кольору, який є відмінним від кольору фону. Для виконання завдання розпізнавання будемо застосовувати метод фільтрації кадру в градаціях сірого, що дозволить перетворити зображення у двійковий формат (чорно-біле). Тож спочатку перетворимо кадр в палітру сірого (grayscale) з RGB. Наступним кроком необхідно встановити граничні значення для пікселів фону й об'єкта. Для цього визначимо цифрові значення відтінків фону та об'єкта. Вони будуть використовуватись для подальшої обробки.

Після обробки кадр перетвориться в двійкове зображення, в якому фон буде позначений чорним кольором, а об'єкт, що має бути розпізнаваним – білим. Далі, для отримання контурів об'єкта, застосуємо контурний метод, використовуючи алгоритм, запропонований Satoshi Suzuki, для аналізу бінарного зображення [118]. Для аналізу форм, а також для виявлення та розпізнавання об'єктів наразі контурування є найефективнішим інструментом. Вони представлені набором чотирьох точок. Коли контурування вже проведено, можна відфільтрувати непотрібні об'єкти за розмірами виділених областей. Для цього обчислюємо розміри об'єктів і відбираємо тільки ті, що відповідають певним параметрам, виключаючи маленькі контури, які можуть показувати сміття або певні відблиски.

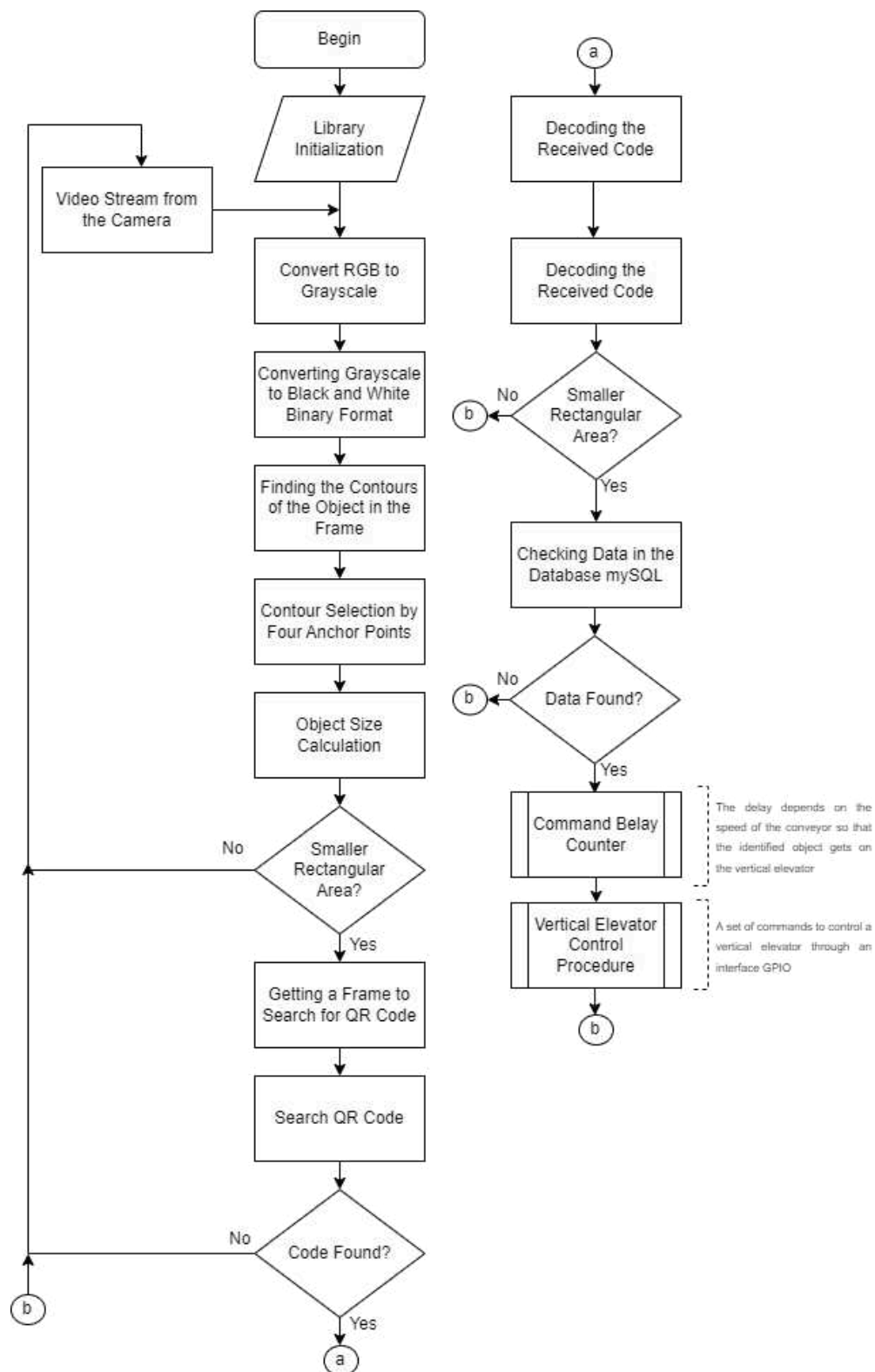


Рисунок 4.26 – Узагальнений алгоритм системи ідентифікації об’єктів на базі комп’ютерного зору.

Наразі QR-коди є найефективнішим і найпростішим засобом розпізнавання. Алгоритм, представлений на рис. 4.26, виконується після

закінчення виконання алгоритму розпізнавання об'єктів. Спочатку на вхід подається кадр зображення у форматі RGB, на якому вже чітко визначено наявність/відсутність об'єкта. Алгоритм сканує його та визначає наявність/відсутність QR-коду. У разі виявлення одного або кількох кодів, відбувається їх декодування для отримання закодованої інформації.

Наведемо опис деяких частин програмного коду, які реалізують найцікавіші рішення. Розробку почнемо з підключення необхідних бібліотек:

```
#include <iostream>
#include <opencv2/objdetect.hpp>
#include <opencv2/core.hpp>
#include <opencv2/imgproc.hpp>
#include <opencv2/imgcodecs.hpp>
#include <opencv2/highgui.hpp>
```

Введемо декілька глобальних змінних, що використовуються для покращення алгоритму розпізнавання.

```
uint32_t objectcounter = 0;
uint32_t objectTrycounter = 1;
bool foundObjectInZone = false;
bool qrCodeIsRead = false;
File *my_file;
```

«objectcounter» це змінна, що використовується в цілях підрахунку кількості розпізнаних об'єктів. «objectTrycounter» також є змінною, яка допомагає покращити роботу алгоритму, зокрема вона веде облік спроб зчитати код з розпізнаного об'єкта. «FoundObjectInZone» змінна, що є прапором, який активується при виявленні об'єкта та деактивується, коли об'єкт покидає робочу зону. «qrCodeIsRead» (теж змінна) працює як прапор, що вмикається після успішного зчитування QR-коду. Остання змінна є вказівником для роботи з файлом, в який записуються результати роботи системи.

Основною функцією програми, точкою входу в неї, є «main». Ця функція ініціює потік даних, який може бути відеофайлом або потоком з камери. Якщо програма не може відкрити потік, вона завершується з помилкою. У рамках цієї функції також відкривається файл для запису результатів. Якщо такий файл ще не існує, він буде створений з іменем «my_file». Потім «main» починає цикл, який триває доти, доки програма продовжує отримувати кадри з потоку. У разі відсутності кадра цикл завершується, і програма припиняє свою роботу.

```
int main()
{
    VideoCapture cap("conveyourSlowMediumLight.MOV");
    if (!cap.isOpened()) {
        cout << "Error open" << endl;
        return -1;
    }
    my_file.open("my_file.txt", ios::out);
    while (1) {
        Mat frame;
        cap >> frame;
        if (frame.empty())
            break;
        FindObjectAndDecode(frame, frame);
        imshow("Base after detection", frame);
        waitKey(5); // waits to display frame
    }
    cap.release();
    destroyAllWindows();
    return 0;
}
```

У циклі відбувається отримання кадру з потоку, цей кадр передається до функції під назвою «FindObjectAndDecode» для обробки кадру, основна мета

якої є розпізнавання об'єкту у кадрі, та в разі розпізнання, виконати пошук та розшифрування QR-коду. Також у циклі відбувається вивід кадру на монітор після обробки.

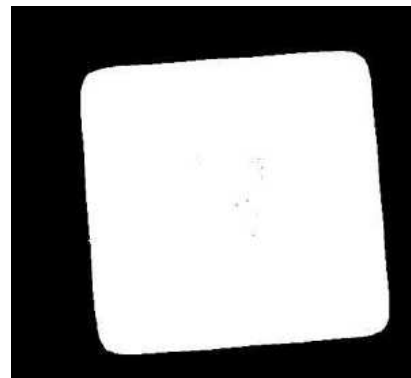
Розробимо функцію обробки кадру з потоку. Функція має назву «FindObjectAndDecode». Згідно розроблених алгоритмів, дана функція виконує перетворення палітри кольорів з формату RGB в відтінки сірого та фільтрує отримані відтінки по граничним значенням для отримання представлення кадру у двійковому вигляді. Частина функції, де відбувається дана обробка зображення представлена нижче:

```
vector<vector<Point>> contours;
vector<Vec4i> hierarchy;
Mat imgGrey;
Mat imgthreshold;
cvtColor(_img, imgGrey, COLOR_BGR2GRAY);
threshold(imgGrey, imgthreshold, 70, 255, THRESH_BINARY);
imshow("eee", imgthreshold);
findContours(imgthreshold, contours, hierarchy, RETR_EXTERNAL,
CHAIN_APPROX_SIMPLE);
vector<RotatedRect> minRect(contours.size());
```

Приклад отримання кадру до обробки та після, представлено на рис. 4.27.



а)



б)

Рисунок 4.27 – Кадр до (а) та після обробки (б)

З бібліотеки OpenCV використовується функція «findContours», за її допомогою на обробленому кадрі проводиться пошук контурів. Тобто вона знаходить контури на зображенні та зберігає їхні точки в колекції. В параметрі функції застосовується «CHAIN_APPROX_SIMPLE» з метою оптимізації використання пам'яті, що дозволяє зберігати лише чотири точки, які формують прямокутник, замість всіх точок контурів.

Якщо контури знайдено завдяки функції «findContours», то всі контури, що мають замалу площу, елімінуються, вважаючи їх випадковими/непотрібними. Далі додаються дві обмежувальні лінії. У випадку, коли об'єкт цілісно розташований між цими лініями, то запускається процес пошуку QR-коду та його декодування. Коли останні точки контуру об'єкта перетинають другу лінію, програма розуміє, що об'єкт вийшов із зони розпізнавання. Приклад отриманого кадру з обмежувальними лініями та виділеним об'єктом, що було розпізнано, представлено на рис. 4.28.

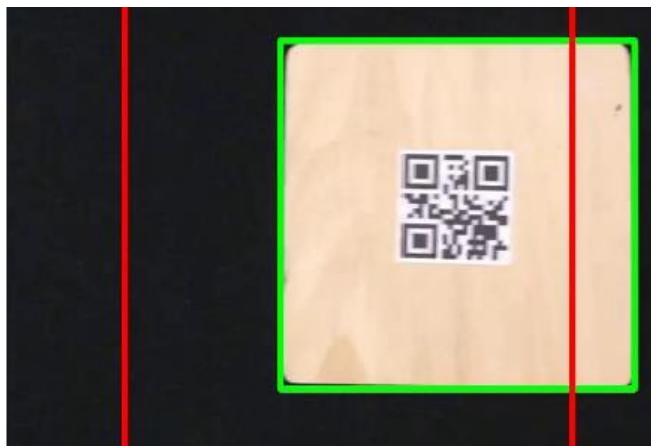


Рисунок 4.28 – Кадр після обробки з обмежувальними лініями та виділенням знайденого об'єкту

Наступним кроком розглянемо частину функції, яка відповідає за прийняття рішень щодо ідентифікації об'єктів. Спочатку в ній відбувається встановлення та перевірка глобальних прапорів, а також визначення розташування об'єкта відносно обмежувальних ліній. Якщо об'єкт вперше потрапляє повністю в зону розпізнавання, що розташована між лініями, ця

подія фіксується в файлі, кадр зберігається в сховище файлової системи. Після цього працює функція пошуку та декодування QR-коду. Якщо код наявний, його визначено, пошук припиняється. В протилежному випадку, коли код не знайдений/не розшифрований, але об'єкт ще в зоні розпізнавання, виконується ще спроба виявити та розшифрувати код. Кількість таких спроб обмежена розмірами зони розпізнавання. Коли об'єкт виходить із неї, стає неможливим реалізовувати спроби ідентифікації. Кожна спроба фіксується в файлі, а також зберігається кадр для кожної спроби.

```
int xVals[4] = { rect_points[0].x , rect_points[1].x , rect_points[2].x ,
rect_points[3].x };

std::sort(xVals, &xVals[4]);
if (xVals[3] < 130) {
if (foundObjectInZone) {
foundObjectInZone = false;
qrCodeIsRead = false;
objectTrycounter = 1;
}
}
else if ((xVals[0] > 130) && (xVals[3] < 600) && !foundObjectInZone &&
!qrCodeIsRead) {
foundObjectInZone = true;
objectcounter++;
imwrite(format("Object%i.jpg", objectcounter), _dst);
my_file << "ObjectFound number:" << objectcounter << endl;
cout << "ObjectFound №" << objectcounter << endl;
Rect crop(130, 50, 470, 850);
Mat croppedImg = _img(crop);
qrCodeIsRead = FindQRAndRead(croppedImg);
}
```

```

else if ((xVals[0] > 130) && (xVals[3] < 600) && foundObjectInZone &&
!qrCodeIsRead) {
    imwrite(format("Object%iTry%i.jpg", objectcounter,
objectTrycounter), _dst);
    my_file << "ObjectFoundAgain number:" << objectcounter << endl;
    cout << "ObjectAgain №" << objectcounter << endl;
    Rect crop(130, 50, 470, 850);
    Mat croppedImg = _img(crop);
    qrCodeIsRead = FindQRAndRead(croppedImg);
    objectTrycounter++;
}
else continue;

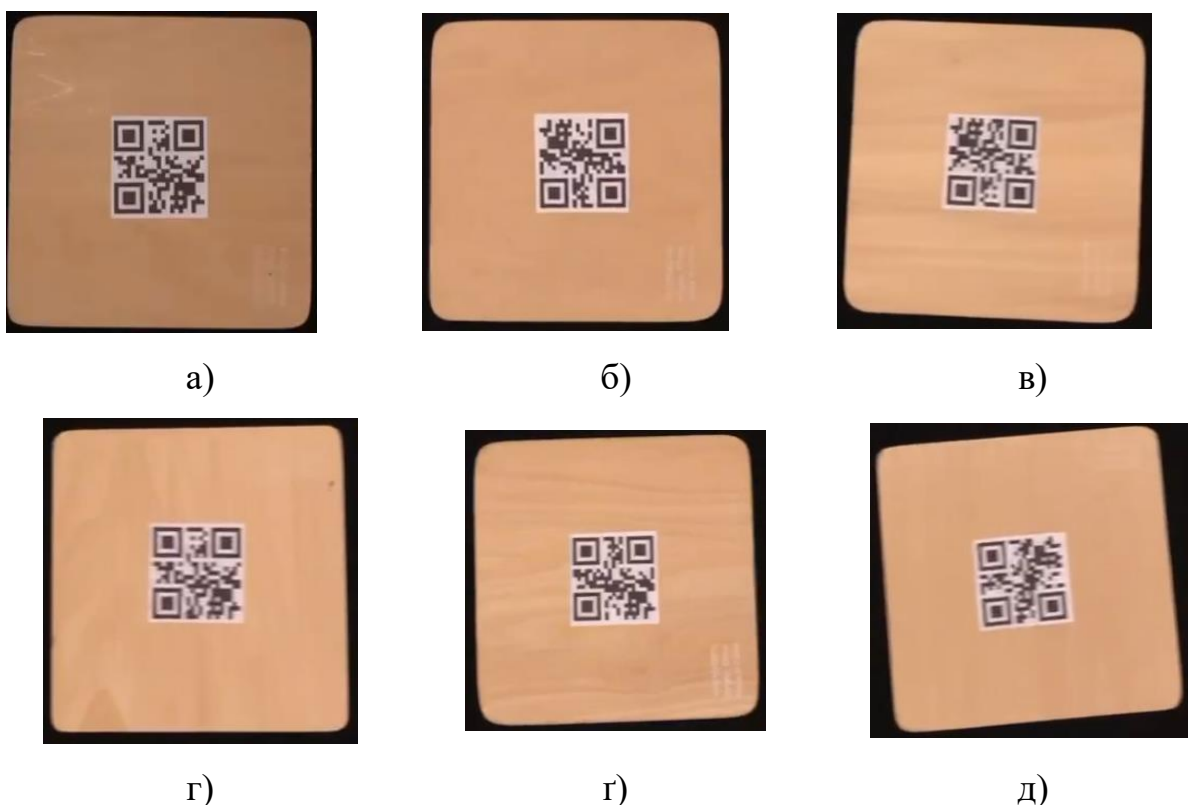
```

Для пошуку та розшифрування QR-коду використовується бібліотека OpenCV. У разі успішного пошуку та декодування дані, які було декодовано, запишуться до файлу, та надано команду на керування вертикальним ліфтом. Якщо не вдалось знайти чи декодувати, то у файл буде записано про помилку декодування.

4.6 Проведення експериментальних досліджень, та аналіз отриманих результатів ідентифікації об'єктів на конвеєрній лінії

Для перевірки розробленого макета ідентифікації об'єктів на промисловій конвеєрній лінії для сортування упаковок за допомогою системи комп'ютерного зору, проведемо низку експериментів на базі обладнання Karelou. Вони дозволять визначити час ідентифікації об'єктів (декодування QR-коду) при різних значеннях наступних параметрів: швидкість конвеєрної лінії, освітленість робочої зони та орієнтація упаковки на лінії конвеєра. В якості камери будемо використовувати Raspberry Pi Cam v1.3.

Приклади тестових QR-кодів для проведення експерименту представлені на рис. 4.29.



б), г), д) QR-код (Detal 1) під різними кутами на конвеєрній лінії;

а), в), г) QR-код (Detal 2) під різними кутами на конвеєрній лінії.

Рисунок 4.29 – Набір тестових QR-кодів для проведення експериментів

У результаті ми маємо 6 тестових наборів QR-кодів, які імітують різний кут орієнтації упаковки на лінії конвеєра, що ускладнює процес ідентифікації.

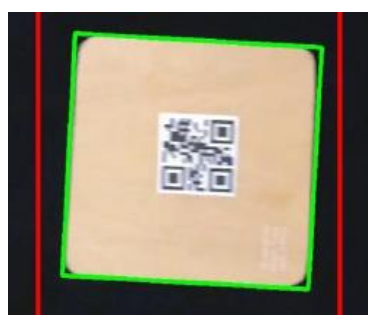
Проведемо перший експеримент з різною швидкістю руху об'єктів на лінії. Відповідно до умов проведемо експеримент для швидкості 0,15 м/с та 0,3 м/с. Для експерименту буде використано шість об'єктів із QR-кодами. Отримані результати подано у табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Результати проведення першого експерименту при різних швидкостях конвеєрної лінії

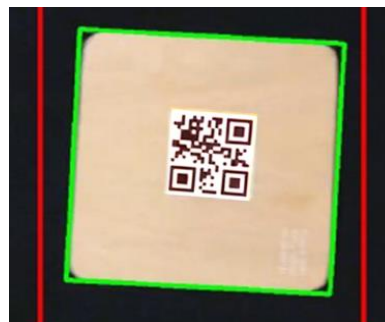
Номер об'єкту	Швидкість пересування об'єктів на конвеєрній лінії		
	0,15 м/с	0,20 м/с	0,3 м/с
Об'єкт № 1 (рис. 4.25а)	++	++	++
Об'єкт № 2 (рис. 4.25б)	++	++	++
Об'єкт № 3 (рис. 4.25в)	++	++	+-
Об'єкт № 4 (рис. 4.25г)	++	++	+-
Об'єкт № 5 (рис. 4.25г)	++	++	+-
Об'єкт № 6 (рис. 4.25д)	++	++	+-

++ - Розпізнано та декодовано; +- – Розпізнано та не декодовано

Виходячи з результатів експерименту впливає наступний висновок: швидкість 0,3 м/с є занадто високою для цієї системи. Це обмеження обумовлено можливостями камери Raspberry Pi Cam v1.3. Приклад отриманого кадру камерою Raspberry Pi Cam v1.3 на швидкості 0,3 м/с, представлено на рисунок 4.26, а, а для порівняння кадр отриманий за допомогою Web-cam Logitech C310 HD (модель 960-001065) на рис. 4.30, б.



а)



б)

а) кадр, отриманий камерою Raspberry Pi Cam v1.3;

б) кадр, отриманий камерою Logitech C310 HD

Рисунок 4.30 – Приклад отриманих кадрів на швидкості 0,3 м/с

Таблиця 4.16 – Результати другого експерименту

Номер об'єкту	Світловий потік (lux) (розпізнано/час декодування QR-коду)		
	250	100	58
Об'єкт № 1 (рис. 4.25а)	+/-0.059 с.	+/-0.055 с.	+/-0.057 с.
Об'єкт № 2 (рис. 4.25б)	+/-0.043 с	+/-0.044 с.	+/-0.047 с.
Об'єкт № 3 (рис. 4.25в)	+/-0.043 с	+/-0.046 с.	+/-0.045 с.
Об'єкт № 4 (рис. 4.25г)	+/-0.069 с	+/-0.087 с.	+/-0.064 с.
Об'єкт № 5 (рис. 4.25г)	+/-0.665 с	+/-0.042 с.	+/-0.068 с.
Об'єкт № 6 (рис. 4.25д)	+/-0.886 с	+/-0.044 с.	+/-0.044 с.

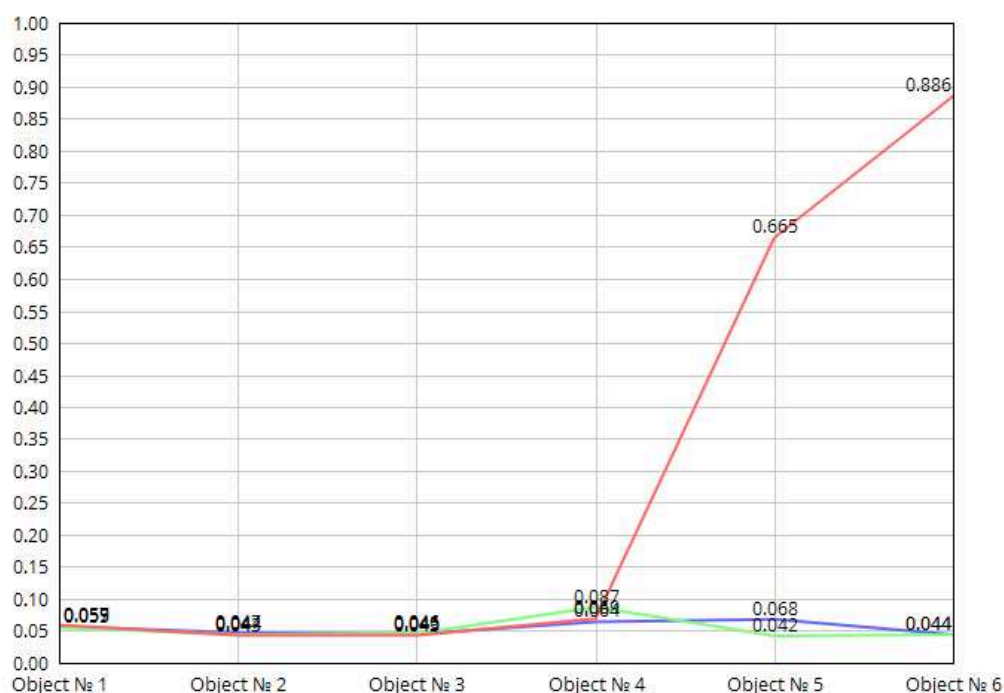


Рисунок 4.31 – Час, що витрачається на декодування QR - коду при швидкості 0,2 м/с

У другому експерименті будемо налаштовувати світловий потік та за допомогою програми виміряємо час, необхідний для декодування QR-коду при русі конвеєра зі швидкістю 0,2 м/с. Час буде дорівнювати різниці часу

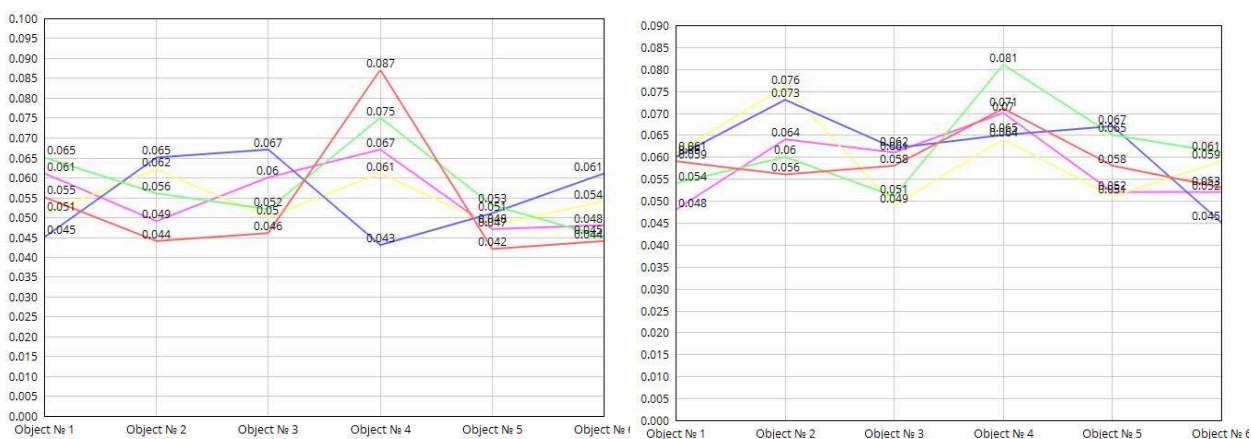
отримання даних з QR-коду та часу розпізнавання об'єкта в кадрі. Результати наведено в табл. 4.16 та на рис. 4.31.

Як можливо бачити, з отриманих результатів при світловому потоці 58-100 lux, усі тестові QR-коди були розпізнані та декодовані, але при світловому потоці 250 lux, було отримана затримка в часі декодування для об'єкту №5 (рис. 4.25, г) та об'єкту № 6 (рис. 4.25, д), це пов'язано з відображенням потоку світла, вигляді світлової плями на отриманням кадру QR-коду.

Останній експеримент спрямовано на дослідження часу декодування коду при швидкості 0,2 м/с, коли немає автоматичної системи вирівнювання орієнтації упаковки на лінії конвеєра. Для проведення цього експерименту використовувались тестові QR-коди (рис. 4.25), з кроком кута повороту 30^0 , результати проведеного експерименту представлені в табл. 4.17, та на рис. 4.32.

Таблиця 4.17 – Результати проведення третього експерименту.

Номер об'єкту	Крок кута (degrees)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Object №1	0.055	0.065	0.045	0.051	0.061	0.059	0.054	0.060	0.061	0.048	0.058	0.066
Object №2	0.044	0.056	0.065	0.062	0.049	0.056	0.060	0.073	0.076	0.064	0.056	0.065
Object №3	0.046	0.052	0.067	0.050	0.060	0.058	0.051	0.062	0.049	0.061	0.049	0.065
Object №4	0.087	0.075	0.043	0.061	0.067	0.071	0.081	0.065	0.064	0.070	0.071	0.071
Object №5	0.042	0.053	0.051	0.048	0.047	0.058	0.065	0.067	0.051	0.052	0.049	0.054
Object №6	0.044	0.045	0.061	0.054	0.048	0.053	0.061	0.045	0.059	0.052	0.049	0.053



а)

б)

а) час декодування QR-коду від 0 до 120°;

б) час декодування QR-коду від 150 до 270°

Рисунок 4.32 – Часу декодування QR-коду при швидкості 0,2 м/с, коли немає автоматичної системи вирівнювання орієнтації упаковки на лінії конвеєра.

Як можливо бачити з отриманих результатів третього експерименту запропонований метод, не дивлячись на різні кути під якими були подані QR-коду під розробленню систему, час декодування склав від min 0.044с до max 0.087с, що дозволяє стверджувати що система добре працює, не зважаючи на орієнтацію об'єкта на конвеєрної стрічки.

Для аналізу отриманих результатів на базі розробленого метода, проведемо порівняння середнього часу розпізнавання QR-коду с алгоритмами Otsu's, Yao's, Niblack's, Di's та Chen. Результати порівняння приведені в табл. 4.18.

Таблиця 4.18 – Порівняння середнього часу розрахунку та швидкості декодування QR-кодів шістьма алгоритмами.

Algorithm	Average Operation Time/s	Recognition Rate	
		~ Zxing	~ WeChat
1	2	3	4
Otsu's algorithm [138]	~ 0.0013	32.5%	32.5%

Продовження таблиці 4.18

1	2	3	4
Niblack's algorithm [139]	~ 1.6063	38.75%	86.25%
Yao's algorithm [140]	~ 0.0046	37.5%	42.5%
Di's algorithm [141]	~ 0.3516	53.75%	71.25%
Chen's algorithm [142]	~ 0.0428	88.75%	92.5%
Proposed method	~ 0.0564	93.42%	96.12%

Як можна бачити з табл. 4.18, швидкості алгоритмів Otsu's, Yao's та Chen's більше, але ефективність розпізнавання мала. Наведені показники даних алгоритмів в статичному режимі отримання QR-коду, порівняння з розробленим методом, коли всі отримані результати були в динамічному режимі роботи конвеєрної лінії на швидкості ~ 0.2 м/с. Якщо порівнювати з алгоритмом Niblack's та Di's запропонований метод має більш високу середню ефективність обчислювання та швидкість розпізнавання. В майбутньому автори планують удосконалити розроблений метод, для впровадження його роботи на базі малогабаритних мікропроцесорних пристрів PoT з вбудованою камерою сімейства ESP32.

4.7 Висновки за розділом 4

У четвертому розділі дисертації представлено результати експериментальних досліджень, що продемонстрували успішну роботу запропонованої системи ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції. Проведена методика досліджень дозволила всебічно оцінити ефективність системи в умовах різних швидкостей руху, рівнів освітлення та кутів зйомки QR-кодів. Макет конвеєрної лінії та система автоматичного керування успішно відтворили реальні умови виробництва, що дало змогу провести точні й достовірні випробування.

Під час першого експерименту було встановлено, що система стабільно розпізнає та декодує всі об'єкти при різних швидкостях конвеєрної лінії, зокрема при 0,15 м/с та 0,20 м/с. Незначні труднощі, що виникли на швидкості 0,3 м/с, не вплинули на загальну ефективність, оскільки більшість об'єктів були розпізнані правильно.

Другий експеримент, проведений за різних рівнів освітленості, підтвердив високу стійкість системи до змін світлового потоку. Система продемонструвала швидке та стабільне декодування QR-кодів при будь-якому рівні освітлення, що свідчить про її ефективність в умовах зниженого або нестабільного освітлення.

Третій експеримент, який включав тестування системи при різних кутах зйомки QR-кодів, показав, що система впевнено працює при будь-яких кутах від 0° до 330° . Незважаючи на незначне збільшення часу декодування на деяких кутах, загальна ефективність залишалася високою.

Порівняння роботи шести алгоритмів розпізнавання показало, що запропонований метод має найкращі результати за точністю та швидкістю декодування. Середній час виконання операцій становив 0,0564 секунди, а точність розпізнавання QR-кодів досягла 96,12%, що перевершує інші розглянуті алгоритми.

Загалом, результати всіх експериментів підтвердили високу ефективність та надійність запропонованих удосконалень системи ідентифікації упаковок на конвеєрній лінії сортування фармацевтичної продукції.

Основні результати четвертого розділу опубліковано у роботах [128, 129-133]. Список джерел, які використано у четвертому розділі, наведено у переліку джерел посилань [125-127, 129, 134-142]

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз сучасних конвеєрних ліній сортування фармацевтичної продукції. Це включає детальне дослідження методів автоматичного керування, виявлення ключових технологічних рішень для сортування продукції, розпізнавання об'єктів на конвеєрних лініях. Особливу увагу приділено графічному оформленню упаковок для забезпечення точності систем автоматичного розпізнавання.

У другому розділі розроблено параметричну модель формалізації упаковки для фармацевтичної продукції, яка дозволила зменшити час на ідентифікацію на 15% порівняно з традиційними методами. Додатково розроблено метод адаптивного навантаження на конвеєрну лінію, що дозволило оптимізувати сортування та рівномірно розподілити навантаження між роботами-сортувальниками, підвищивши продуктивність на 12%.

Третій розділ присвячено вдосконаленню методів нормалізації зображень QR-кодів та кодування інформації. Застосування вдосконалених алгоритмів дозволило на 20% підвищити точність розпізнавання QR-кодів при зовнішніх пошкодженнях, завдяки використанню кодів Ріда-Соломона для виправлення помилок.

Четвертий розділ містить результати експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність розроблених моделей і методів. Запропонована система дозволила збільшити швидкість сортування на 25% та підвищити загальну ефективність роботи фармацевтичної конвеєрної лінії на 18%. Практична реалізація методів відображена в інтеграції системи в навчальні програми та в реальних виробничих умовах.

Результати проведеного дослідження є перспективними для розробки наступних поколінь конвеєрних ліній, що розроблюються у відповідності до концепцій Industry 4.0 та Industry 5.0.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bevzyuk, R., & Lyashenko, O. Система розпізнавання об'єктів для автоматизації складів з використанням згорткової нейронної мережі. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. № 2(72), 68-74
2. Kumar, G. Optimizing pharmaceutical supply chain with digital technologies. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 9(2), 727-731. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.2.0666>
3. Nevliudov, I., Maksymova, S., Klymenko, O., & Bilousov, M. (2023). Development of a mobile robot prototype with an interactive control system. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. № 3(73), 128-133.
4. Kumar, G. (2023). Pharmaceutical drug packaging and traceability: A comprehensive review. *Universal Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2023. Vol. 19-25. <https://doi.org/10.31586/ujpp.2023.769>
5. Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Вжесневський М. О., Клименко О. М. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі. //VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. 87-88
6. Scientific and technological strength. URL: <https://en.zrbyl.com/sbzs.html>.
7. WANG, Haijun; WANG, Honglei. Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyor. *Coal science and technology*. 2023. 50.12: 225-239.
8. Kawalec, W., Suchorab, N., Konieczna-Fuławka, M., & Król, R. (2020). Specific energy consumption of a belt conveyor system in a continuous surface mine. *Energies*. 2020. Vol. 13(19), 5214.

9. WANG, Tian, et al. Adaptive optimization method in digital twin conveyor systems via range-inspection control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 19.2: 1296-1304.
10. Radovic, S., Pap, S., Niemi, L., Prodanović, J., & Sekulic, M. T. (2023). A review on sustainable technologies for pharmaceutical elimination in wastewaters—A ubiquitous problem of modern society. *Journal of Molecular Liquids*, 383, 122121. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122121>
11. Kavasidis, I., Lallas, E., Gerogiannis, V. C., Charitou, T., & Karageorgos, A. Predictive maintenance in pharmaceutical manufacturing lines using deep transformers. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 220, 576-583. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.073
12. ESS Technologies: Compact robotic systems. URL: <https://www.packworld.com/home/product/15692990/ess-technologies-ess-technologies-compact-robotic-systems>
13. Keek, J. S., Loh, S. L., & Chong, S. H. Design and control system setup of an E-pattern omniwheeled cellular conveyor. *Machines*, 2021. Vol. 9(2), 43.
14. Guelpa, V., Laurent, G. J., Dahroug, B., & Le Fort-Piat, N. Modular contact-free conveyors for handling planar fragile objects. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016. Vol. 33(1), 92-101.
15. Bajda, M., & Hardygóra, M. Analysis of the Influence of the Type of Belt on the Energy Consumption of Transport Processes in a Belt Conveyor. *Energies*, 2021. Vol. 14(19), 6180.
16. Zeng, F., & Xie, Z. Y. Coordinated control system of multi-level belt conveyors for promotion the energy efficiency based on IoT-Technology. In *2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)* (2018, July). pp. 675-679. IEEE.
17. Осадчий С.І. Smart Packaging Of Pharmaceutical Products. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2024. № 4(78), 119-122. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.119>

18. Hrechukha, Lesia; Kuzebna, Vladyslava. *Невербальні засоби переконання у оформленні упаковки фармацевтичної продукції. Language: codification, competence, communication*. 2021. №1 (4): 47-55.
19. Сташиса, В. В. Штрих-кодування фармацевтичної продукції в системі протидії обігу фальсифікованих медичних препаратів. // Укладачі: Гаркуша А.О, Забуга Ю.Ю, Михайліченко Т.О. *Кримінальні правопорушення проти публічного здоров'я в проєкті кримінального кодексу України: Матеріали науково-практичного вебінару*, Харків, 2021, 73.
20. Lomartire, Silvia; Marques, João C.; Gonçalves, Ana MM. An overview of the alternative use of seaweeds to produce safe and sustainable bio-packaging. *Applied Sciences*. 2022. 12.6: 3123.
21. Caban, Magda; stepnowski, Piotr. How to decrease pharmaceuticals in the environment? A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2021. 19: 3115-3138.
22. ДСТУ 4169-2003 «Маркування продукції»
23. ДСТУ EN ISO 15378:2017 "Первинне пакування для медичних виробів. Особливі вимоги до застосування ISO 9001:2015"
24. Наказ МОЗ України № 723 від 29.10.2012 "Про затвердження методичних рекомендацій щодо маркування лікарських засобів"
25. ISO 15378:2017 "Primary packaging materials for medicinal products – Particular requirements for the application of ISO 9001:2015"
26. ISO 11607-1:2019 "Packaging for terminally sterilized medical devices"
27. GS1 Healthcare standards
28. EU Directive 2011/62/EU (Falsified Medicines Directive)
29. 21 CFR Part 211 (Current Good Manufacturing Practice for Finished Pharmaceuticals)
30. Vora, L. K., Gholap, A. D., Jetha, K., Thakur, R. R. S., Solanki, H. K., & Chavda, V. P. Artificial intelligence in pharmaceutical technology and drug delivery design. *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15(7), 1916. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071916>

31. Koshovyi, M. D., Ashhepkova, N. S., & Luchko, A. S. Modeling of Manipulator Grip Reaches with Regard to Generalized Coordinate Constraints. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2022. (1)
32. Кошовий, М. Д. Метод синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора автономного мобільного робота. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання*.—Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № (1), 5.
33. Гребеннік, І., Коваленко, О. Нечітка модель прийняття рішень для автоматичної сортувальної лінії пошти. *АСУ та прилади автоматики*. 2024. № 180, 16-26.
34. Abdallah, S., & Nizamuddin, N. Blockchain-based solution for pharma supply chain industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. 177, 108997. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108997>Get rights and content
35. Thomas, J., Bajpai, I. K., Cherukat, S., & Lalmohan, K. S.. Iot-Based Transport Monitoring System for Pharmaceutical Industry Check for updates. In *Proceedings of the NIELIT's International Conference on Communication, Electronics and Digital Technology: NICEDT-2024*. 2024. Vol. 2, p. 131. Springer Nature.
36. Padlowska, A. The Management of Pharmaceutical Transport in Context of the COVID-19 Pandemic. *Humanitas University's Research Papers Management*. 2022. Vol. 23(4), 121-139.
37. Saharan, V. A. Robotic automation of pharmaceutical and life science industries. In *Computer Aided Pharmaceutics and Drug Delivery: An Application Guide for Students and Researchers of Pharmaceutical Sciences*. 2022. pp. 381-414. Singapore: Springer Nature Singapore.
38. Zaiets, N., Lutska, N., Lysenko, V., Bolbot, I., Osadchiy, S. Design and development of intelligent control strategies and algorithms for automated control of biotechnical objects under uncertainty. *Decision Analytics Journal*. 2024. 10, 100416.
39. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O., Demska N., Vzhesnievskiy M. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms

In Warehousing 4.0. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 4 (18). С. 57-64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>.

40. Dashkov, D., Liashenko, O. Motion capture with MEMS sensors. *Advanced Information Systems*, 2023. 7(2), 57-62.

41. Nevlyudov I., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference*, Kharkiv, October 20-21, 2022: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2022. P. 24-26.

42. Nunavath, R. S., & Nagappan, K. Future of Pharmaceutical Industry: Role of Artificial Intelligence, Automation and Robotics. *Journal of Pharmacology & Pharmacotherapeutics*. 2024. 15(2).

43. Arden, N. S., Fisher, A. C., Tyner, K., Lawrence, X. Y., Lee, S. L., & Kopcha, M. Industry 4.0 for pharmaceutical manufacturing: Preparing for the smart factories of the future. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021 Vol. 602, 120554.

44. Osadchyi, S. I., Zozulya, V. A., Kalich, V. M., & Timoshenko, A. S. The frequency method for optimal identification of close-loop system elements. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2023. Vol. (4), 195-195.

45. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M. Shuttle-Based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development . *Journal of Natural Science and Technologies*. 2023. Vol. 2 No. 2 P.232-237.

46. Fiorini, P., & Botturi, D. Introducing service robotics to the pharmaceutical industry. *Intelligent Service Robotics*. 2008. Vol. 1, 267-280.

47. Khandagale, S. S., Bappasaheb, N. O., Khose, A. S., Kshirsagar, P., Nemane, P., & Thube, R. H. Role of Pharmaceutical Automation and Robotics in

Pharmaceutical Industry: A Review. *Systematic Reviews in Pharmacy*. 2024. Vol. 15(3).

48. Ke, W. A. N. G., Hui, Z. H. A. N. G., Yihong, C. A. O., Junfei, Y. I., Xiaofang, Y. U. A. N., & Yaonan, W. A. N. G. Intelligent robots and key technologies for pharmaceutical production. *Computer Integrated Manufacturing System*. 2022. Vol. 28(7), 1981.

49. Stasevych, M., & Zvarych, V. Innovative robotic technologies and artificial intelligence in pharmacy and medicine: paving the way for the future of health care—a review. *Big Data and Cognitive Computing*. 2023. Vol. 7(3), 147.

50. Khandagale, S. S., Bappasaheb, N. O., Khose, A. S., Kshirsagar, P., Nemane, P., & Thube, R. H. Role of Pharmaceutical Automation and Robotics in Pharmaceutical Industry: A Review. *Systematic Reviews in Pharmacy*. 2024. Vol. 15(3).

51. Nunavath, R. S., & Nagappan, K. Future of Pharmaceutical Industry: Role of Artificial Intelligence, Automation and Robotics. *Journal of Pharmacology & Pharmacotherapeutics*. 2024. Vol. 15(2).

52. Kamaraj, A., & Puranik, S. Automation in pharmaceutical industry and global regulatory compliance. *Journal of Current Pharma Research*. 2023. Vol. 17(4), 13-25.

53. Bello, W., Pezzatti, J., Berger-Gryllaki, M., Rudaz, S., Sadeghipour, F. Development of a generic approach for monitoring leachable compounds in hospital pharmacy-prepared prefilled plastic packaging by ultrahigh-performance liquid chromatography coupled to high-resolution mass spectrometry with postcolumn infusion. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2023. Vol. 236, 115640.

54. Goryk, O., Brykun, O., Ivanov, O., Koval'chuk, S., & Muravlov, V. Automated system of shot blasting processing of free surfaces of metal products. *Scientific Progress & Innovations*. 2023 Vol. 26(2), 122-128.

55. ISO/IEC 18004 Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Bar code symbology — QR Code

56. ISO/IEC 16022:2006—Data Matrix bar code symbology specification
57. ISO/IEC 15415—2-D Print quality standard
58. ISO/IEC 15418:2016—Symbol data format semantics (GS1 application identifiers and ASC MH10 data identifiers and maintenance)
59. ISO/IEC 15424:2008—Data Carrier Identifiers (including Symbology Identifiers) [IDs for distinguishing different barcode types]
60. ISO/IEC 15434:2006—Syntax for high-capacity ADC media (format of data transferred from scanner to software, etc.)
61. ISO/IEC 15459—Unique identifiers
62. Good Manufacturing Practices [https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/gmp#:~:text=Good%20Manufacturing%20Practices%20\(GMP%2C%20also,required%20by%20the%20product%20specification](https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/gmp#:~:text=Good%20Manufacturing%20Practices%20(GMP%2C%20also,required%20by%20the%20product%20specification)
63. Rahmat, G., & Widarman, A. Analisa Aspek Good Manufacturing Practices (GMP) pada UKM Tahu XYZ. *Jurnal Sains, Ekonomi dan Hukum*. Vol. 1(1), 13-22.
64. Sharma, A., Gamta, V., & Luthra, G. The Importance of Good Manufacturing Practices (GMP) in the Healthcare Industry. *Journal of Pharmaceutical Research International*. Vol. 35(18), 75-90.
65. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O., Vzhesniewski M. Features Of Wave Algorithm Application In Warehouse Logistics Transport Systems. Information systems in project and program management: *Collective monograph* edited by I. Linde – European University Press. Riga: ISMA, 2023. – P. 251-261.
66. Hole, G., Hole, A. S., & McFalone-Shaw, I. Digitalization in pharmaceutical industry: What to focus on under the digital implementation process?. *International Journal of Pharmaceutics*: 2021. X, 3, 100095.
67. Hock, S. C., Kian, S. M., & Wah, C. L. Global challenges in the manufacture, regulation and international harmonization of GMP and quality

standards for biopharmaceuticals. *Generics and Biosimilars Initiative Journal*. 2020. Vol. 9(2), 52-64.

68. Joseph, I. Importance of Compliance With Regulations in the Pharmaceutical Industry. 2023. Available at SSRN 4679812.

69. Mishra, S., Yadav, S., Singh, N., Dahiya, R., Verma, S., Tripathi, S. M.. Digitalization in the Pharmaceutical Industry: Prioritization Throughout the Digital Transformation. In *Pharmaceutical industry 4.0: Future, Challenges & Application*. 2023 (pp. 1-22). River Publishers.

70. Ilarraza Marzán, V. (2021). Quality in the Pharmaceutical Industries. *Manufacturing Competitiveness Program*;

71. Johanna, I., Daudeij, A., Devina, F., Nijenhuis, C., Nuijen, B., Romberg, B., ... & Kuball, J. Basics of advanced therapy medicinal product development in academic pharma and the role of a GMP simulation unit. *Immuno-Oncology and Technology*. 2023. Vol. 20, 100411.

72. Guadagnino, E., Guglielmi, M., & Nicoletti, F. Glass: The best material for pharmaceutical packaging. *International Journal of Applied Glass Science*. 2022. Vol. 13(3), 281-291.

73. Ashiwaju, B. I., Orikpote, O. F., Fawole, A. A., Alade, E. Y., & Odogwu, C. A step toward sustainability: A review of biodegradable packaging in the pharmaceutical industry. *Matrix Science Pharma*. 2024. Vol. 7(3), 73-84.

74. Singh, S., Malik, A., Rawat, A. P., Tevetia, N., Aggarwal, R., Goswami, S., ... & Pathak, A. Regulatory considerations of material used for medical devices and combination products in different countries: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2023.

75. Ghosh, I., Gutka, H., Krause, M. E., Clemens, R., & Kashi, R. S. A systematic review of commercial high concentration antibody drug products approved in the US: formulation composition, dosage form design and primary packaging considerations. In *MAbs* (2023, December). Vol. 15, No. 1, p. 2205540. Taylor & Francis.

76. Çapkın, İ. Y., Gökelma, M. A review on characterization and recyclability of pharmaceutical blisters. *Cleaner Waste Systems*. 2023. Vol. 4, 100082.
77. Rathore, A. S., Li, Y., Chhabra, H., & Lohiya, A. FDA warning letters: a retrospective analysis of letters issued to pharmaceutical companies from 2010–2020. *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2023. Vol. 18(2), 665-674.
78. Xiong, S., Jiang, W., Meng, R., Hu, C., Liao, H., Wang, Y., ... & Tian, M. Factors associated with the uptake of national essential public health service package for hypertension and type-2 diabetes management in China's primary health care system: a mixed-methods study. *The Lancet Regional Health–Western Pacific*. 2023. Vol. 31.
79. В.І. Чуєшов, Л.М. Хохлова, О.О. Ляпунова та ін. Технологія ліків промислового виробництва; за ред. В.І. Чуєшова. — Х., 2003.
80. Borrelli, E. P., Saad, P., Barnes, N., Dumitru, D., & Lucaci, J. D. Estimating the economic impact of blister-packaging on medication adherence and health care costs for a Medicare Advantage health plan. *Journal of Managed Care & Specialty Pharmacy*. 2024. 1-13.
81. Izzah, Z., Zijp, T. R., Åberg, C., Touw, D. J., & van Boven, J. F. Electronic smart blister packages to monitor and support medication adherence: a usability study. *Patient preference and adherence*. 2022. 2543-2558.
82. Pal, R., Pandey, P., Thakur, S. K., Khadam, V. K. R., Dutta, P., Chawra, H. S., & Singh, R. P. The significance of pharmaceutical packaging and materials in addressing challenges related to unpacking pharmaceutical products. *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Innovation*. 2024. Vol. 1(03), 149-173.
83. Liu, K., & ODonovan, J. F. (2023). Pharmacy packaging and inserts. In StatPearls [Internet]. *StatPearls Publishing*. 2023.
84. Falconnier-Williams, O. C., Taeschner, W., Hille, A., Falconnier, A. D., & Haefeli, W. E. Untapped options to reduce waste from blister packaging for tablets and capsules. *European Journal of Clinical Pharmacology*. 2024. Vol. 80(1), 151-161.

85. Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. An overview of the alternative use of seaweeds to produce safe and sustainable bio-packaging. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(6), 3123.
86. Mahendraratnam, N., Mercon, K., Gill, M., Benzing, L., & McClellan, M. B. Understanding use of real-world data and real-world evidence to support regulatory decisions on medical product effectiveness. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*. 2022. Vol. 111(1), 150-154.
87. Shete, N. A., Mohan, R. S., Kotame, R. N., Gore, S. J., & Tagad, R. R. Changing scenario of packaging in pharmaceutical industry. *World Journal of Pharmaceutical Research*. 2020. Vol. 9(1), 1786.
88. Zakirovich, N. I. Simulation of the Process of Selection of the Optimum Type of Rolling Stock for Transportation of Medicines to the Consumer. *World Bulletin of Social Sciences*. 2022. Vol. 17, 176-186.
89. Spence, C. The multisensory design of pharmaceuticals and their packaging. *Food Quality and Preference*. 2021. Vol. 91, 104200.
90. Chelliah, R., Khan, I., Wei, S., Madar, I. H., Sultan, G., Daliri, E. B. M., ... & Oh, D. H.. Intelligent packaging systems: food quality and intelligent medicine box based on nano-sensors. In *Smart Nanomaterials in Biomedical Applications*. 2022. 555-587. Cham: Springer International Publishing.
91. Petrov, K., Kobzev, I., Orlov, O., Kosenko, V., Kosenko, A., Vanina, Y. Devising a method for identifying the model of multi-criteria expert estimation of alternatives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4(3), 112.
92. Sah, S. K., & Kaity, S. Pharmaceutical packaging: Recent trends and challenges. *Dosage Forms, Formulation Developments and Regulations*. 2024. 663-684.
93. Sharma, N. Pharmaceutical sector: Packaging requirement in serialization. *International Journal of Science and Research Archive*. 2024. 11(2), 1719-1725.

94. Гребеннік, І., Чайковська, О., & Коваленко, О. Модель прийняття рішень в інформаційних технологіях управління логістичних компаній. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2024. № 7(1), 38-45.
95. Clarion, J. B., Francois, J., Grebennik, I., & Dupas, R. A simulated annealing approach for optimizing layout design of reconfigurable manufacturing system based on the workstation properties. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55(10), 1657-1662.
96. Khuu, N. H. L., Pham, V. A., Vu, T. T. C., Binh Dao, V. T., Truong, T. D., Nguyen, N. P., & Vo, T. Q. A study on design and control of the multi-station multi-container transportation system. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(5), 2686.
97. Jebbor, S., El Afia, A., Zouadi, T., & Beaulieu, M. Hospital Logistics Digitalization and Automation: Usage and Outcomes-A Review Study. In *International Conference on Logistics Operations Management*. (2024, May). 26-36. Cham: Springer Nature Switzerland.
98. Truong, T. D., Khuu, N. H. L., Le, Q. D., Vu, T. T. C., Tran, H. B., & Vo, T. Q. A General Overview of Overhead Multi-Station Multi-Shuttle Systems and the Innovative Applications Trend in Vietnam. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(19), 11036.
99. Klymenko, O. Research On The Application Of The Round Robin Algorithm For Load Balancing On Conveyor Lines In The Pharmaceutical Industry. *Grail of Science*. 2024. Vol. (35), 170–172. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.01.2024.028>
100. Klymenko O. Research on the Application of Dynamic Programming Algorithm for Load Balancing on Conveyor Lines in the Pharmaceutical Industry / O. Klymenko // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale*, Paris, 1er Mars 2024. Paris-Vinnytsia. P.184-186. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.041>

101. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. "The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2024. No. 1 (24), P. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.000>
102. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Mospan, D., Klymenko, O. Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) on September 27-30, 2023, Kremenchuk, Ukraine
103. Bočák, R., Holubek, R., & Kusá, M. Influence of working height on the energy consumption of an industrial robot. In *Journal of Physics: Conference Series* (2024, February). Vol. 2714, No. 1, p. 012003. IOP Publishing.
104. Shaker, W. K., & Klimchik, A. Stiffness-based Offline Toolpath Error Compensation for Robotized Incremental Forming. In *2023 7th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR)* (2023, August). 48-53. IEEE.
105. Ferrarini, S., Bilancia, P., Raffaelli, R., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. A method for the assessment and compensation of positioning errors in industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 85, 102622.
106. Alayedi, M. Quality of Service Improvement of 2D-OCDMA Network Based on Two Half of ZCC Code Matrix. In *Proceedings of International Conference on Information Technology and Applications: ICITA 2022* (2023, May). 499-509. Singapore: Springer Nature Singapore.
107. Tiwari, S. An introduction to QR code technology. In *2016 international conference on information technology (ICIT)* (2016, December). 39-44. IEEE.
108. Karrach, L., & Pivarčiová, E. Options to use data matrix codes in production engineering. *Management Systems in Production Engineering*. 2018. Vol. 26(4), 231-236.

109. Karrach, L., & Pivarčiová, E. Comparative study of data matrix codes localization and recognition methods. *Journal of Imaging*. 2021. Vol. 7(9), 163.
110. Liu, Y., Song, Y., Gu, G., Luo, J., Wang, T., & Jiang, Q. A Data Matrix Code Recognition Method Based on L-Shaped Dashed Edge Localization Using Central Prior. *Sensors*. 2024. Vol. 24(13), 4042.
111. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O. Development of the QR-Code Frame Processing Method for Sorting Conveyor Lines // *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції*. – Черкаси, 2023. С.158-160.
112. Sotnikov, A., Tiurina, V., Petrov, K., Lukyanova, V., Lanovyy, O., Onishchenko, Y., ... & Breus, P. Using the set of informative features of a binding object to construct a decision function by the system of technical vision when localizing mobile robots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. (9).
113. Dashkov, D., & Liashenko, O. Motion capture with MEMS sensors. *Advanced Information Systems*. 2023. Vol. 7(2), 57-62.
114. Abdul-Majid Wazwaz. A reliable treatment for mixed Volterra–Fredholm integral equations, *Applied Mathematics and Computation*. 2002. Vol. 127(2-3), 405-414.
115. Czanner, G., Sarma, S. V., Ba, D., Eden, U. T., Wu, W., Eskandar, E., ... & Brown, E. N. Measuring the signal-to-noise ratio of a neuron. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112(23), 7141-7146.
116. Youlian Zhu, Cheng Huang. An Improved Median Filtering Algorithm for Image Noise Reduction. *Physics Procedia*. 2012. Vol. 25, 609-616.
117. Susan, S., Rachna Devi, K.M. Text area segmentation from document images by novel adaptive thresholding and template matching using texture cues, *Pattern Analysis and Applications*. 2020. Vol. 23, 869–881.

118. Satoshi Suzuki, Keiichi A., Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985. Vol. 30(1), 32-46.
119. Klymenko O. Концепція роботи алгоритмів машинного навчання на базі методу найближчих сусідів для балансування навантаження на конвеєрних лініях сортування продукції // *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 1 (75). – С. 28-30. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.028>
120. Mansurova, M., Belgibayev, B., Zaitin, Y., Asset, A., Sarsembayeva, T., & Tyulepberdinova, G. Coordinate Robot for Smart Search and Recognition by QR Code of Preparations of a Pharmacy Warehouse. In *2023 IEEE 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)* (2023, October). 1-6. IEEE.
121. Petrov, K. E., & Kyrychenko, V. V. Видалення компонентів дощу з одиночних зображень з використанням рекурентної нейронної мережі. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2023. Vol. (2), 91-91.
122. Yevsieiev V, Nevliudov I., Maksymova S., Omarov M., Klymenko O. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support. *Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal*, 17, No. 6, - PP: 1073-1088. doi:10.18576/amis/170615
123. Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O. Development of the QR-Code Frame Processing Method for Sorting Conveyor Lines // *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції*. – Черкаси, 2023. С.158-160.
124. Koshevoy, N., Ilina, I., & Tokariyev, V. Implementation of the gravity search method for optimization by cost expenses of plans for multifactorial experiments. *Radioelectron Comput Syst*. 2023. Vol. 1(105): 23–32.

125. Xu, J., Luo, C., Parr, G., & Luo, Y. A spatiotemporal multi-channel learning framework for automatic modulation recognition. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2020. Vol. 9(10), 1629-1632.
126. Zhong, Z., Cui, J., Liu, S., & Jia, J. Improving calibration for long-tailed recognition. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2021. 16489-16498.
127. Ngugi, L. C., Abelwahab, M., & Abo-Zahhad, M. Recent advances in image processing techniques for automated leaf pest and disease recognition—A review. *Information processing in agriculture*. 2021. Vol. 8(1), 27-51.
128. Deutsches Patent- und Markenamt «Robotermodul sowie Industrieroboter mit Robotermodul» Aktenzeichen: 20 2023 102 166.2
129. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., & Klymenko O. Development of a Hardware Module for Programming Microcontrollers Based on the Cortex-M Architecture. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 2023. Vol. 3(3), 171–181.
130. Nevliudov I., Maksymova S., Yevsieiev V., & Klymenko O. Using Mecanum Wheels for Radio Shuttle. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 2023. Vol. 3(3), 182–187.
131. Nevliudov I., Chala O., Botsman I., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture // *Proceedings of the XII International Scientific Conference «Functional Basis of Nanoelectronics»*. – Odesa, September 20-24, 2021. – PP. 74-77.
132. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Starodubcev, N., & Klymenko, O. Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT. In *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (2023, September). 1-5. IEEE.
133. Патент на винахід №126885 «Автоматизована складська логістична станція», зареєстровано в Державному реєстрі України винаходів 15.02.2023.

134. Avazov, K., Hyun, A. E., Sami S, A. A., Khaitov, A., Abdusalomov, A. B., & Cho, Y. I. (2023). Forest fire detection and notification method based on AI and IoT approaches. *Future Internet*. 2023. Vol. 15(2), 61.
135. Maestro, M. A., Bañas, A. R., Lofamia, M. C., Aguinaldo, R. A., Bernabe, R., Occeña, D. J., ... & Soriano, M. Development of an airborne hyperspectral scanning camera system for agricultural missions. In 38th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2021) (2021, September). Vol. 2021, 258-263. IET.
136. Marino, P., Roman Quintero, D. C., Santonastaso, G. F., & Greco, R. Prototype of an IoT-based low-cost sensor network for the hydrological monitoring of landslide-prone areas. *Sensors*. 2023. Vol. 23(4), 2299.
137. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R., Control System Development and Implementation of a CNC Laser Engraver for Environmental Use with Remote Imaging. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 9140156.
138. Otsu, N., A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1979. Vol. 9(1), 62-66.
139. P. Ranjitha, T.D. Shreelakshmi, A Hybrid Ostu based Niblack Binarization for Degraded Image Documents. In *2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2021. 1-7.
140. Yao, S., Li, P., He, L., Li, Y., Uneven Illumination Two-Dimensional Code Image Recognition Algorithm Research. In *Proceedings of the 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. 2018. 2043–2046.
141. Z. Duan, Y. Zhang, S. Li, Binarization of Nonuniform Illumination Barcode. In *Proceedings of the International Conference on Machine Vision and Applications*. 2018. 18–21,

142. Chen, R.; Yu, Y.; Xu, X.; Wang, L.; Zhao, H.; Tan, H.-Z. Adaptive Binarization of QR Code Images for Fast Automatic Sorting in Warehouse Systems, *Sensors*. 2019. Vol. 19(24), 5466 (2019).