

О. В. КАНІВЕЦЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

О. І. БІЛОВОД

кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3470-0091

Д. С. ТАРАСЕНКО

старший викладач кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-4818-0963

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ДІЛЬНИЦЬ

Стаття присвячена проблемі підвищення ефективності та якості роботи транспортних систем механоскладальних дільниць машинобудівних підприємств. Недосконала організація матеріальних потоків подовжує виробничий цикл; виникають проблеми обладнання та персоналу; збільшуються витрати на паливо та обслуговування транспорту. Метою роботи є дослідження ефективності функціонування та якості роботи транспортної системи механоскладальної дільниці на основі розробки та впровадження методики оптимізації матеріальних потоків. Проведено огляд наукової літератури з питань внутрішньовиробничої логістики. Розглянуто застосування теорії графів для моделювання маршрутів. Проаналізовано методи імітаційного моделювання транспортних систем. Вивчено принципи ощадливого виробництва у цеховій логістиці. Досліджено ефективність різних видів промислового транспорту. Встановлено відсутність комплексної методики, яка поєднує аналіз потоків, планування простору та динамічне моделювання. У роботі обґрунтовано застосування інформаційних технологій у проектуванні серійного виробництва. Описано основні завдання транспортної системи цеху. Виділено чотири етапи проектування виробничих систем. Запропоновано методику вибору оптимальної схеми розташування обладнання, що базується на положеннях методу графів. Критерієм оптимізації виступає мінімум потужності вантажопотоку. Вихідними даними стали номенклатура деталей, технологічні маршрути та величини вантажопотоків. Побудовано графи матеріальних зв'язків між одиницями обладнання. Створено матриці схем розташування для дворядного компонування. Розроблено правила розрахунку енергії вантажопотоку. Методику доцільно застосовувати при проектуванні гнучких автоматизованих дільниць. Вона придатна для реструктуризації діючого виробництва. Перестановка обладнання при зміні номенклатури забезпечує планувальну гнучкість. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств.

Ключові слова: механоскладальні дільниці, транспортні системи, вантажопотік, маршрут, метод графів.

O. V. KANIVETS

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4364-8424

O. I. BOLOVOD

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-3470-0091

D. S. TARASENKO

Senior Lecturer at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0002-4818-0963

IMPROVING THE EFFICIENCY AND QUALITY OF TRANSPORT SYSTEMS IN MECHANICAL ASSEMBLY DEPARTMENTS

The article is devoted to the problem of improving the efficiency and quality of transport systems in mechanical assembly shops of machine-building enterprises. Imperfect organization of material flows prolongs the production cycle; equipment and personnel downtime occurs; fuel and transport maintenance costs increase. The aim of the work is to study the efficiency and quality of the transport system of a mechanical assembly shop based on the development and implementation of a methodology for optimizing material flows. A review of scientific literature on intraservice logistics was conducted. The application of graph theory for route modeling was considered. Methods of simulation modeling of transport systems were analyzed. The principles of lean production in workshop logistics were studied. The efficiency of various types of industrial transport was investigated. The absence of a comprehensive methodology combining flow analysis, space planning, and dynamic modeling was established. The work substantiates the use of information technologies in the design of serial production. The main tasks of the workshop's transport system are described. Four stages of production system design have been identified. A methodology for selecting the optimal equipment layout based on graph theory has been proposed. The optimization criterion is the minimum cargo flow capacity. The initial data consisted of the nomenclature of parts, technological routes, and cargo flow values. Graphs of material connections between equipment units were constructed. Layout matrices for two-row configurations were created. Rules for calculating cargo flow energy were developed. The methodology is advisable to use when designing flexible automated sections. It is suitable for restructuring existing production. Rearranging equipment when changing the nomenclature provides planning flexibility. The research results are of practical importance for increasing the competitiveness of machine-building enterprises.

Key words: mechanical assembly areas, transport systems, cargo flow, route, graph method.

Постановка проблеми

Машинобудівна галузь є однією з основних складових промислового комплексу розвинених країн. В умовах глобальної конкуренції підприємства прагнуть підвищити ефективність виробництва та знизити собівартість продукції. Значний потенціал для цього забезпечує оптимізація внутрішньовиробничої логістики, зокрема транспортних систем механоскладальних цехів. Транспортні операції не створюють доданої вартості продукції, проте становлять від 15% до 40% її кінцевої собівартості [1]. Недосконала організація матеріальних потоків зумовлює подовження виробничого циклу, утворення «вузьких місць», простої обладнання та персоналу, а також підвищення витрат на паливо, ремонт і технічне обслуговування транспортних засобів [2]. Отже, актуальність дослідження визначається потребою у розробленні науково обґрунтованих методів і засобів, спрямованих на мінімізацію логістичних витрат шляхом раціоналізації руху матеріальних ресурсів у межах виробничого підрозділу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі підвищення ефективності та якості роботи внутрішньовиробничих транспортних систем є постійною темою наукових дискусій. Так, у роботі [3] розглядається теоретичне використання теорії графів, яку можна використати, для моделювання внутріцехового переміщення заготовок та деталей. Автор запропонував різноманітні алгоритми пошуку найкоротших шляхів, проте розроблені моделі руху не враховують динамічний характер виробничих процесів. Дослідження методів імітаційного моделювання та аналізу пропускної здатності транспортних систем машиноскладальних цехів наведено у роботі [4]. Симуляційний підхід розрахунку транспортних систем показав ефективність під час виявлення «вузьких місць» між робочими зонами дільниці, але у дослідженні відсутні практичні інструменти для оптимізації просторового планування цехів. Впровадження принципів ощадливого виробництва у внутрішньоцеховій логістиці вивчають науковці Карвац А. (Karwasz A.) та Скуза Д. (Skuz D.) [5]. Проведені дослідження виявили залежність між мінімізацією запасів і застосуванням системи «точно в терміни», що приводять до зниження навантаження на транспортну систему та скорочення непродуктивних витрат. Аналіз ефективності використання різних видів промислового транспорту, зокрема навантажувачів, візків і конвеєрів розглянуто у [6]. У дослідженні надано рекомендації щодо вибору транспортних засобів залежно від умов виробництва, проте не розглянуто проблему взаємозв'язку з плануванням виробничих дільниць. Робота [7] присвячена використанню картування потоку створення вартості як інструменту впровадження ощадливого виробництва та основи для заходів з удосконалення, зокрема, для ефективного впровадження методів Kanban і Milkrun, які дають змогу оптимізувати просторове розташування виробничих дільниць. Водночас ефективність використання такого підходу залежить від наявності точних даних про інтенсивність потоків, отримання яких без моделювання є складним завданням. Дослідження [8] зосереджене на економічних аспектах функціонування внутрішньоцехового транспорту. Автори пропонують моделі розрахунку

транспортних витрат, що забезпечують оцінювання ефективності організаційних змін, проте не передбачають формування оптимізаційних рішень.

Таким чином, більшість досліджень зосереджується на окремих аспектах удосконалення внутрішньовиробничих транспортних систем. Наразі відсутня комплексна методика, що поєднує аналіз інтенсивності матеріальних потоків, раціональне планування виробничого простору та динамічне імітаційне моделювання для перевірки запропонованих рішень. Представлене дослідження спрямоване на усунення цієї науково-практичної прогалини.

Формулювання мети дослідження

Дослідження ефективності функціонування та якості роботи транспортної системи механоскладальної дільниці на основі розробки та впровадження методики оптимізації матеріальних потоків.

Викладення основного матеріалу дослідження

Транспортна система суттєво впливає на роботу всього виробництва. Вона забезпечує своєчасне завантаження та розвантаження обладнання заготовками і інструментами, а також виконання складських операцій. Від оптимальної організації матеріальних потоків та структури транспортної системи залежить рівень завантаження устаткування, використання площі, витрати енергії та обсяг експлуатаційних витрат. Як результат це визначає собівартість продукції.

Основні завдання транспортної системи наступні: доставка вантажів зі складу у потрібний час на відповідну виробничу дільницю; переміщення, орієнтація і встановлення напівфабрикатів у визначений момент на необхідне обладнання; зняття напівфабрикатів або готової продукції з устаткування з подальшим транспортуванням у задане місце; передавання вантажів у накопичувач і своєчасна їх видача; доставка напівфабрикатів та готової продукції з виробничих дільниць на склад.

Технологічне обладнання переміщують у випадку реструктуризації, технічного переоснащення чи реконструкції діючого виробництва, а також під час проектування нового цеху. Просторове розміщення верстатів формує структуру технологічної системи та визначає особливості матеріальних потоків. На їх організацію припадає до 70% витрат на виготовлення продукції, а в окремих випадках і до 80% [9]. Тому зниження загальних витрат можливе через удосконалення виробничої структури, що передбачає переміщення основного обладнання та перегрупування виробів, що обґрунтовує потребу у створенні технологічно орієнтованих систем. Одночасно виникає завдання розробки та розвитку науково-методичних основ подібної реструктуризації. Проблематика аналізу, синтезу й удосконалення структури технологічних систем серійного машинобудівного виробництва має значний науковий інтерес.

Ефективність виробничого процесу, значною мірою, визначається способом організації транспортування. Транспортні операції відображають зв'язки між етапами технологічного процесу. Система транспортування повинна забезпечувати своєчасне та послідовне виконання запитів основного обладнання, складів і накопичувачів щодо заготовок, напівфабрикатів і готової продукції.

Зменшити трудомісткість транспортування можливо завдяки використанню автоматизованих засобів у цехах і на виробничих дільницях. Використання однотипних транспортних засобів у межах виробничої системи полегшує їх експлуатацію та керування.

Для автоматизації завантаження і розвантаження основного обладнання та його поєднання з транспортною системою застосовують промислові роботи. Під час проектування дільниць і цехів використовують різні принципи формування, що залежать від номенклатури та обсягу випуску продукції, які у свою чергу визначають форму організації виробництва. У випадку поступового зростання номенклатури виробів доцільно враховувати спільність технологічних маршрутів їх виготовлення та застосовувати предметний принцип формування виробничих дільниць. Виходячи з описаного принципу, а також попередньо визначеного складу і кількості обладнання, встановлюють кількість верстатів на кожній дільниці.

Сучасні механоскладальні дільниці та цехи є складними динамічними системами. Проектування подібних систем включає чотири етапи: структурно-функціональний, алгоритмічний, параметричний і планувальний. У разі масштабних завдань синтез кінцевого результату може проходити у кілька циклів з різним рівнем деталізації даних і прийнятих рішень. Кожен цикл охоплює всі названі етапи. Наприклад, при проектуванні цеху перший цикл завершується створенням компоновки, другий – плануванням виробничих дільниць.

Суть структурно-функціонального етапу полягає у створенні структурної моделі, яка відображає склад, тип і взаємозв'язки елементів, а також функціональної моделі, що враховує властивості елементів і системи для виконання ними своїх завдань. Даний етап проектування технологічної системи виробничого підрозділу супроводжується визначенням комплексу технологічних процесів, формуванням основи проекту, обранням обладнання, встановленням складу дільниць і кількості верстатів.

Алгоритмічний етап передбачає побудову алгоритмічної моделі, яка відображає взаємозв'язки між елементами та підсистемами у процесі виробництва. На цьому етапі здійснюється вибір порядку обслуговування заготовок і розробляються графіки, що підтверджують достатність визначеної кількості обладнання.

На параметричному етапі проектування визначають кількісні характеристики зв'язків між фізичними параметрами елементів системи. Параметричні моделі описують рівняння матеріально-енергетичного балансу в різних формах. У межах цього етапу виконують розрахунки параметрів потоків матеріальних, енергетичних та інформаційних ресурсів. На основі отриманих результатів встановлюють склад і кількість допоміжного обладнання, визначають потребу в обслуговуючих системах та формують вимоги до виробничої інфраструктури.

Завершальний планувальний етап спрямований на визначення просторових зв'язків між елементами системи. Моделі даного етапу подібні до структурних, проте оцінювання зв'язків між елементами здійснюється в метриці евклідового простору. Результатом є планувальне рішення розміщення виробничих дільниць. Кожен етап синтезу технологічної системи виробництва поділяється на кілька підетапів, що характеризуються власними обмеженнями. Процес проектування може здійснюватися двома підходами. Перший передбачає введення зворотних зв'язків, які забезпечують можливість повернення до попереднього етапу у разі невідповідності встановленим обмеженням. Другий полягає у поділі етапів на послідовність проектних завдань, впорядкованих таким чином, щоб мінімізувати або усунути потребу повторного повернення до попередніх рішень.

Серійні технологічні системи мають унікальні особливості у структуризації сукупності технологічних процесів виготовлення продукції. Структуризація підвищує організаційний рівень складових системи та скорочує час переходу від виготовлення одного виду виробу до іншого. Процес структуризації сукупності технологічних процесів називають уніфікацією. Під час уніфікації здійснюється перехід від великої кількості окремих технологічних процесів до меншої кількості уніфікованих. Критерієм вибору оптимальної схеми розташування обладнання виступає мінімум потужності вантажопотоку або матеріального потоку.

Організація оптимальних вантажопотоків передбачає скорочення довжини транспортних маршрутів, мінімізацію перетинів і розгалужень, усунення петель і зворотних трас, а також забезпечення зручності обслуговування транспортних засобів. Раціональна схема розміщення верстатів на виробничій дільниці зменшує потребу у транспортних засобах, скорочує прості обладнання, покращує управління виробництвом та знижує капітальні, енергетичні та експлуатаційні витрати. Зменшення потужності матеріального потоку за рахунок раціонального розташування обладнання потребує застосування методів оптимізації під час вибору найбільш доцільної схеми розміщення технологічного обладнання на предметних дільницях.

Проектування раціональної схеми розташування технологічного обладнання на предметних дільницях здійснюють методами оптимізації та математичного моделювання. Вибір оптимальної схеми проводять за методикою, що базується на положеннях методу графів. Вихідними даними розрахунку є номенклатура деталей, технологія їх виготовлення у вигляді послідовності обладнання для проведення конкретних операцій механічної обробки, а також величина матеріального або вантажопотоку для кожної групи деталей.

Вихідні дані вибору оптимальної схеми розташування технологічного обладнання наступні:

- технологічний маршрут 3–6–1–4–5 відповідає обробці деталі 1 із величиною вантажопотоку 3;
- технологічний маршрут 4–2–6–5 відповідає обробці деталі 2 із величиною вантажопотоку 1;
- технологічний маршрут 2–5–4 відповідає обробці деталі 3 із величиною вантажопотоку 5;
- технологічний маршрут 1–3–2 відповідає обробці деталі 2 із величиною вантажопотоку 2.

Побудову матриці схеми розташування технологічного обладнання розпочинаємо із створення графів матеріальних зв'язків (рис. 1) між одиницями обладнання у варіанті довільного дворядного розташування, що є найбільш поширеним у виробництві. Ребра графа відображають величину вантажопотоку між окремими одиницями. Більш раціональним варіантом є поєднання входу і виходу вантажопотоку з виробничої дільниці, що дає змогу скоротити кількість холостих переміщень внутрішньоцехового транспорту.

Після аналізу отриманих результатів визначаємо верстат із найбільшим потенціалом і ставляємо його на першу позицію. Відповідно до розрахунків граф змінюємо. Спираючись на значення потенціалів, заповнюємо матрицю схеми розташування обладнання на виробничій дільниці. Використовуємо наступні правила: коли обладнання, з якого починається вантажопотік, розташоване в сусідньому ряду, записуємо величину вантажопотоку для цього маршруту; коли через один ряд – вносимо від'ємне значення вантажопотоку; коли через два ряди – подвоєне від'ємне значення, і так далі; коли обладнання за маршрутом знаходиться в одному ряду – фіксуємо подвоєну величину вантажопотоку.

Після обчислення енергії вантажопотоку для всіх технологічних маршрутів та заповнення матриці, орієнтованої на вхід і вихід, визначаємо сумарне значення енергії для кожної одиниці обладнання. Шляхом підсумовування енергії всіх одиниць отримуємо загальну енергію вантажопотоку побудованої схеми розташування обладнання.

Для перевірки оптимальності схеми виконуємо перестановку обладнання з найменшим потенціалом. Для нової матриці за тією ж методикою обчислюємо енергію та порівнюють її з початковим значенням. Якщо отримане значення енергії менше, то початкова схема вважається раціональнішою. Якщо більше – виконуємо подальший пошук у тій самій послідовності, поки не буде знайдено схему з максимальною потенційною енергією вантажопотоку. В умовах автоматизованого проектування можливий автоматичний пошук оптимальної схеми розташування обладнання на виробничій дільниці за алгоритмом, що враховує наведені вище правила.

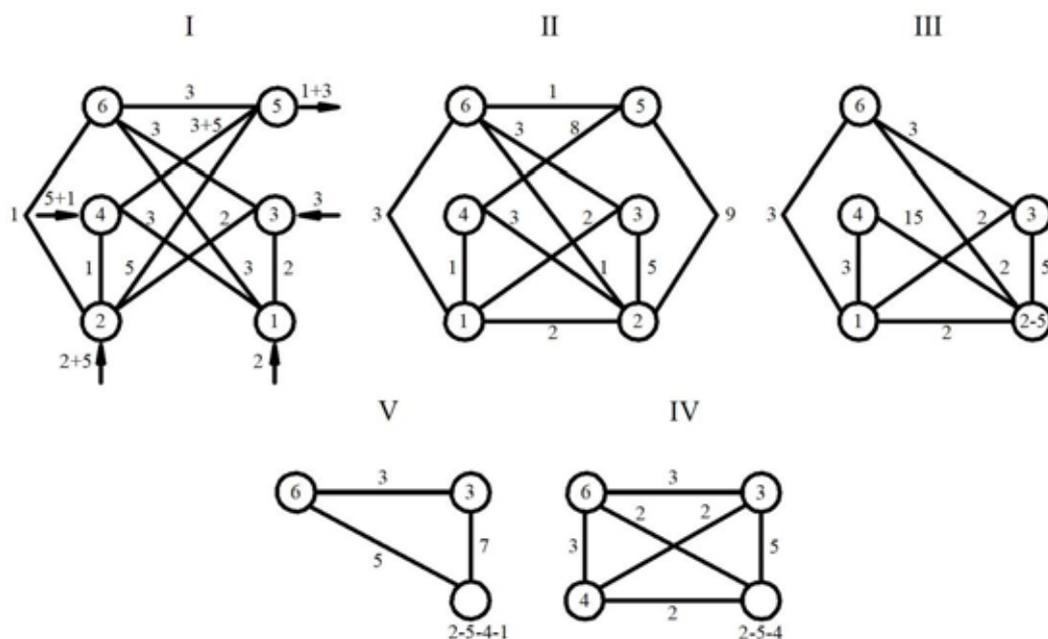


Рис. 1. Графи матеріальних зв'язків між технологічним обладнанням

Висновки

Запропоновану методику побудови схем розташування технологічного обладнання на предметних дільницях, яка базується на поєднанні методів оптимізації, доцільно застосовувати не лише під час проектування гнучких автоматизованих дільниць, а й у процесі їх експлуатації шляхом перестановки обладнання при зміні номенклатури продукції, що забезпечує планувальну гнучкість виробництва, під час проектування як нових виробничих дільниць, так і для реструктуризації, технічного переоснащення чи реконструкції діючого виробництва.

Список використаної літератури

1. Fenta E. W., Tsegaye A. A., Abere A. E. Opportunities in Flexible Manufacturing Systems in the Near Future. *Glob J Flex Syst Manag.* 2025. № 26. pp. 247–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00437-z>.
2. Rouhollah Khakpour, Ahmad Ebrahimi, Seyed-Mohammad Seyed-Hosseini; Lean process mining: adopting process mining in lean manufacturing for dynamic process mapping and avoiding waste occurrence in real time. *International Journal of Lean Six Sigma.* 2025. № 16 (1). pp. 231–255. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2024-0059>.
3. Кузьменко І. М. Теорія графів. Київ : КІП ім. Ігоря Сікорського. 2020. 71 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafov.pdf.
4. Foit K., Gołda G., Kampa A. Integration and Evaluation of Intra-Logistics Processes in Flexible Production Systems Based on OEE Metrics, with the Use of Computer Modelling and Simulation of AGVs. *Processes.* 2020. Vol. 8(12). pp. 1648. <https://doi.org/10.3390/pr8121648>.
5. Karwasz A., Skuza D. Improving Internal Transport. *Lecture Notes in Electrical Engineering.* Springer, Cham. 2019. Vol. 505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_53.
6. Salawu G., Glen B. Improving the Efficiency of a Conveyor System in an Automated Manufacturing Environment Using a Model-Based Approach. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.* 2023. Vol. 12. No. 2. pp. 107–112. DOI: 10.18178/ijmerr.12.2.107-112.
7. Álvarez R., Calvo R., Peña M. M., Domingo R. Redesigning an Assembly Line Through Lean Manufacturing Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2008. Vol. 43. pp. 949–958. DOI: 10.1007/s00170-008-1772-2.
8. Ramos B., Araújo J., Ramos J., Ferreira A. C. Improving Material Delivery Routes on Automotive Industry Assembly Lines Through the Application of Lean Logistics: A Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. 2025. pp. 165–177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94484-0_14.
9. Aguilar-Landaeta C. C., García-Saona J. K., Meza-Ortiz R. N. Lean Manufacturing Implementation in Textile Dyeing: A Study of Process Optimization and Waste Reduction in a Peruvian SME. *International Journal of Recent Engineering Science.* 2025. Vol. 12. № 3. pp. 35–46. DOI: <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V12I3P105>.

References

1. Fenta, E.W., Tsegaye, A.A., & Abere, A.E. (2025). Opportunities in Flexible Manufacturing Systems in the Near Future. *Glob J Flex Syst Manag*, 26, pp. 247–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00437-z>
2. Rouhollah, Khakpour, Ahmad, Ebrahimi, Seyed-Mohammad, & Seyed-Hosseini (2025). Lean process mining: adopting process mining in lean manufacturing for dynamic process mapping and avoiding waste occurrence in real time. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16(1), pp. 231–255. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2024-0059>
3. Kuzmenko, I. M. (2020). Teoriia hrafiv. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafiv.pdf [In Ukrainian].
4. Foit, K., Gołda, G., & Kampa, A. (2020). Integration and Evaluation of Intra-Logistics Processes in Flexible Production Systems Based on OEE Metrics, with the Use of Computer Modelling and Simulation of AGVs. *Processes*, 8(12), 1648. <https://doi.org/10.3390/pr8121648>.
5. Karwasz, A., Skuza, D. (2019). Improving Internal Transport. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Cham, vol. 505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_53.
6. Salawu, G., & Glen, B. (2023). Improving the Efficiency of a Conveyor System in an Automated Manufacturing Environment Using a Model-Based Approach. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 12, No. 2, 107–112. DOI: 10.18178/ijmerr.12.2.107-112.
7. Álvarez, R., Calvo, R., Peña, M. M., & Domingo, R. (2008). Redesigning an Assembly Line Through Lean Manufacturing Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 949–958. DOI: 10.1007/s00170-008-1772-2.
8. Ramos, B., Araújo, J., Ramos, J., & Ferreira, A.C. (2025). Improving Material Delivery Routes on Automotive Industry Assembly Lines Through the Application of Lean Logistics: A Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 165–177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94484-0_14.
9. Aguilar-Landaeta C. C., García-Saona J. K., & Meza-Ortiz R. N. (2025). Lean Manufacturing Implementation in Textile Dyeing: A Study of Process Optimization and Waste Reduction in a Peruvian SME. *International Journal of Recent Engineering Science*, Vol. 12, № 3, 35–46. DOI: <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V12I3P105>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025