МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621:004.942 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.3.1

О. І. КЛЮЄВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6803-0706

Д. О. ДМИТРІЄВ
доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

С. А. РУСАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1003-4867

І. А. ШАТОХІНА
старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5767-3674

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛОГІСТИКИ СЕРВІСНИХ ДІЛЬНИЦЬ СКЛАДАННЯ ТА РЕМОНТУ АГРЕГАТІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У статті розглянуто актуальні питання підвищення ефективності технологічної логістики сервісних дільниць складання та ремонту агрегатів двигунів внутрішнього згоряння на основі сучасних засобів імітаційного моделювання. Використано сучасні цифрові технології для проєктування, аналізу й оптимізації виробничих систем машинобудівного профілю. Особливу увагу приділено дослідженню параметрів і структурній модернізації автоматизованих складальних дільниць та її вплив на параметричні властивості виробничої дільниці як логістичної системи, а саме, на пропускну здатність, надійність обладнання, рівномірність матеріальних потоків і завантаженість робочих станцій. Проведено аналіз ефективності функціонування автоматизованої дільниці на прикладі складання карбюраторів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та визначено шляхи удосконалення її структури за рахунок застосування міжопераційних накопичувачів, зміни конфігурації потоків і використання роботизованих засобів переміщення виробів. Використано програмне середовище Siemens Tecnomatix Plant Simulation для створення імітаційної моделі на рівні цифрового двійника виробничої системи і виконано серію віртуальних експериментів у режимі реального часу. Розглянуто імітаційну модель автоматизованої складальної дільниці з урахуванням фактичних нормативів часу виконання операцій, параметрів надійності обладнання та структури технологічних потоків. Проведено порівняльний аналіз роботи традиційної схеми без буферних накопичувачів і модернізованих варіантів із застосуванням накопичувачів різної ємності. Визначено найбільш завантажені ділянки системи, де виникають черги, блокування та простої обладнання. Показана можливість досягнення за рахунок використання імітаційної моделі Tecnomatix рівномірного завантаження робочих станцій, скорочення втрат продуктивності та підвищення обсягу випуску готової продукції в результаті структурних змін автоматизованої дільниці. Показано комплексне застосування імітаційного моделювання для оптимізації логістичних і технологічних параметрів сервісних виробничих систем.

Ключові слова: *моделювання, продуктивність, автоматизована дільниця, надійність, САПР, двигуни внутрішнього згоряння.*

© О. І. Клюєв, Д. О. Дмітрієв, С. А. Русанов, І. А. Шатохіна, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0
ISSN 2078-4481

O. I. KLIUIEV
Ph. D., Associate Professor, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6803-0706

D. O. DMYTRIIEV
Sc. D., Professor, at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

S. A. RUSANOV
Ph. D., Associate Professor, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1003-4867

I. A. SHATOKHINA
Senior Lecturer at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-5767-3674

SIMULATION MODELING OF TECHNOLOGICAL LOGISTICS OF SERVICE SECTIONS FOR ASSEMBLY AND REPAIR OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE UNITS

The article addresses current issues related to improving the efficiency of technological logistics in service sections for the assembly and repair of internal combustion engine units using modern simulation modeling tools. Contemporary digital technologies are applied for the design, analysis, and optimization of mechanical engineering production systems. Special attention is given to the study of parameters and structural modernization of automated assembly sections and its impact on the parametric properties of the production unit as a logistical system, namely throughput capacity, equipment reliability, uniformity of material flows, and workstation utilization. An analysis of the operational efficiency of an automated section is carried out using the example of internal combustion engine (ICE) carburetor assembly, and ways to improve its structure are identified through the use of inter-operational buffers, changes in flow configuration, and the implementation of robotic material handling systems. The Siemens Tecnomatix Plant Simulation software environment is used to create a simulation model at the level of a digital twin of the production system, and a series of virtual experiments is conducted in real time. A simulation model of an automated assembly section is developed, taking into account actual standard operation times, equipment reliability parameters, and the structure of technological flows. A comparative analysis is performed between a traditional layout without buffer storage and modernized variants with buffers of different capacities. The most heavily loaded system sections, where queues, blocking, and equipment idle times occur, are identified. The results demonstrate the possibility of achieving, through the use of the Tecnomatix simulation model, a more balanced workload distribution across workstations, reduced productivity losses, and increased output of finished products as a result of structural changes in the automated section. The study shows the comprehensive application of simulation modeling for optimizing logistical and technological parameters of service production systems.

Key words: *modeling, productivity, automated workstation, reliability, CAD systems, internal combustion engines.*

Постановка проблеми

В умовах сучасного виробництва та сервісного обслуговування технічних об’єктів, зокрема технологічного обладнання в машинобудуванні, транспортної і сільгосптехніки, енергетичного обладнання, робототехнічних систем, авіаційної та суднобудівної техніки, існує потреба в зручних, якісних а головне достовірних інструментах оцінки комплексних проєктних рішень від ескізу виробу до його умов експлуатації та ремонту. Актуальною у цьому напрямі є методологія функціонально-модульного моделювання роботи виробничих систем або ремонтних ділянок, зокрема автоматичних ліній, роботизовано-механічних комплексів, комплексів технічного обслуговування, гнучких ремонтно-виробничих систем – як із використанням стандартних засобів САПР, так і об’єктно-орієнтованих систем програмування, а також систем імітаційного моделювання виробничих процесів із візуалізацією всіх віртуальних дій, що відбуваються в процесі виготовлення або ремонту технічного об’єкта. Такі системи актуальні не тільки при безпосередньому прийнятті технічних рішень, а й в навчальному середовищі за рахунок високої адаптованості до користувача [1-3]. В роботі розглядається застосування вказаного підходу

стосовно виготовлення вузлів систем живлення двигунів внутрішнього згоряння (карбюраторні ДВЗ відповідного спектру застосування), щодо яких спостерігається падіння рівня їх сервісного обслуговування з одночасно високим якісним рівнем безпосередньо виготовлення деталей. Створення віртуальних прототипів автоматичних та автоматизованих дільниць, що мають функції як виготовлення, так і ремонту деталей, дозволяє швидко оцінити їх як з технологічної, так і економічної точок зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Функціонально модульне проєктування технологічних машин і виробничих систем виникло як результат застосування принципів системного підходу, який полягає в розгляді частин складних явищ-процесів та систем-машин з врахуванням їх взаємодії [1-3]. Проєктування виступає як комплексна проблема, в якій у складному взаємозв'язку переплітаються завдання синтезу, моделювання, аналізу, оцінки, оптимізації і відбору альтернатив. В результаті синтезу створюються проєктні рішення, що мають нову якість на відміну від своїх елементів. Залежно від виду елементів розрізняють системи типу «Процес», елементами якої є елементарні операції, та систему типу «Об'єкт», елементами якої є об'єкти. Технологічна машина об'єднує в собі обидва типа систем, а структура системи однозначно визначає її функціонування. Однак одна і та сама функція системи може бути реалізована різними варіантами структури. Загальний підхід передбачає послідовне розв'язання таких завдань створення нової техніки:

– представлення службової функції технологічного обладнання у вигляді функціональної моделі;

– на основі функціональної моделі побудування альтернативних варіантів принципів дії технологічного обладнання, які реалізують задану службову функцію з заданою точністю і обмеженням;

– створення компонування технологічного обладнання із набору функціональних модулів, які реалізують заданий принцип дії.

Окремі модифікації компоновок лінії відрізнятимуться видом модулів, їх кількістю і наявністю допоміжного транспортно-накопичувального устаткування. Транспортно-накопичувальна система повинна забезпечувати пропускну здатність потокової лінії та мінімізувати витрати продуктивності потокової лінії, що формуються при транспортуванні деталей між технологічними машинами.

Проєктування компоновок автоматичних ліній мають чітко визначені три етапи:

– моделювання обладнання шляхом створення його цифрових макетів;

– формування компоновки лінії за допомогою цифрових макетів технологічного і транспортно-накопичувального обладнання;

– аналіз статистичних даних;

– оформлення технічних креслень автоматичної лінії.

Для проєктування складальних технологічних процесів і ліній широко використовують теорію графів [3]. Системологічні моделі будуються на основі графів, узагальненням яких є гіперграф, де міститься множина вершин та ребер (дуг), що описують систему взаємозв'язків операцій, стану деталі та їх відношення один до одного. Послідовність складання або обробки в основному визначається конструкцією виробу, що схематично представляється умовним зображенням порядку комплектування виробу та вузлів. На таких схемах кожен елемент виробу представляють прямокутником, в якому вказується найменування складальної частини, її індекс і кількість [2-4].

Процес віртуального проєктування полягає у використані для вибраного варіанта електронних твердотільних моделей елементів машин для отримання її конструктивного варіанта в традиційному вигляді. Основні терміни, що використовуються при віртуальному проєктуванні, стосуються характеристик цифрових моделей машин та їх елементів [5].

При застосуванні принципу віртуального проєктування технологічних машин із створенням моделей функціональних модулів (ФМ) виділяють три шляхи формування моделі машин:

– коли задача вибору ФМ і зв'язків між ними зводиться до задачі простої оптимізації;

– коли задача зводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації;

– перехід від принципу оптимальності до принципу обґрунтованості .

Необхідною умовою широкого впровадження методики віртуального проєктування є простота і доступність її використання проєктувальниками. В результаті такого моделювання можна перевірити коректність характеристик службового призначення технологічних машин відносно вихідної постановки задачі проєктування, заданого технічним завданням. При проєктуванні для подальшого доведення того, що обладнання функціонує відповідно до вимог технологічного завдання, мета віртуального проєктування визначається як трійка [5-7]:

$$W_i = \langle H_i, A_i, D_i \rangle,$$

де H_i – математична модель технічного завдання; A_i – метод розв'язання задачі проєктування; D_i – вхідні та вихідні дані (результати проєктування).

Алгоритм процесу проєктування відбувається шляхом виділення основних проєктних процедур, до яких відносяться:

– деталізація службового призначення машин;

– створення специфікацій моделей типових функціональних модулів та розробка критеріїв оцінки кожного з них;

– компонування із типових функціональних модулів певної кількості варіантів структури машин, кожен з яких забезпечує виконання службової функції;

– розробка системи критеріїв оцінки структури машини, оцінювання за їх допомогою кожного із варіантів машини та вибір кращого.

Процес віртуального проєктування розділяється на дві стадії. На першій з них здійснюється формування принципу функціонування обладнання, в результаті чого можливо виділення із загальної службової функції обладнання, набору окремих технологічних функції $\Phi = Y_i f_i$, де f_i – елементарна технологічна функція, що входить до складу службового призначення технологічного обладнання. На другій стадії, яка є краще формалізованою, вибирається раціональний варіант обладнання (технологічна машина – ТМ), як поєднання вибраних функціональних модулів (ФМ) та зв'язків між ними $ТМ = Y_i m_i$, де m_i – i-тий функціональний модуль машинного обладнання.

Модель кожного із ФМ представляють як кортеж

$$m_i = \langle f_i, P_i \rangle = \langle f_i, X_i, Y_i \rangle,$$

де $P_i = \langle X_i, Y_i \rangle$ – вектор змінних, що описують i-тий ФМ.

Однак для вирішення завдання дослідження складних технологічних систем необхідно описувати безліч пристроїв і підсистем, виводити різноманітну статистику роботи на ділянках моделі, неодноразово змінювати параметри блоків (пристроїв) для проведення імітаційних експериментів. В процесі еволюції інструментальних засобів імітаційного моделювання на цей момент з'явилося безліч програмних пакетів, які зазвичай використовують в модельній структурі об'єкти, властивості, черги і ресурси. Ці пакети поділяються на два основних типи: предметно-орієнтовані програми моделювання (побудова моделі за допомогою графічного інтерфейсу); мови імітаційного моделювання (написання програмного коду). Серед усього розмаїття програмних рішень найбільший інтерес представляють GPSS World, Extend, AnyLogic, Arena, Simulink, Factory I/O, Siemens Plant Simulation [4, 6-13].

Формулювання мети дослідження

На основі імітаційного моделювання в середовищі Siemens Plant Simulation з лінійки Tecnomatix провести аналіз ефективності роботи автоматизованих лінії і дільниць за критеріями фактичної продуктивності з урахуванням відмов та нециклових простоювань на кожну деталь безперебійної роботи одиниць обладнання і ступенем завантаженості на прикладі дільниці складання карбюраторів для двигунів малої потужності (генератори, малопотужна мототехніка). На основі узагальненої технологічної схеми запропонувати альтернативні рішення і компонування автоматизованих ліній, що враховують групові та модульні технології складання і ремонту.

Викладення основного матеріалу дослідження

В даній роботі побудовано і досліджено імітаційну модель автоматизованої дільниці в системі Siemens Plant Simulation (технологічну схему складання подано на рис. 1). Норми часу для кожної складальної операції прийнято за даними реального виробництва по нормативних документах. Plant Simulation є візуальним об'єктно-орієнтованим середовищем для побудови імітаційних моделей широкого класу систем, входить до складу продуктової лінійки Tecnomatix компанії Siemens PLM Software та використовується у багатьох галузях промисловості [4,8,9,14,15].

За результатами моделювання автоматично збирається статистика – продуктивність за проміжок часу, час використання обладнання, ступінь заповнення накопичувачів. Робота в системі дозволяє виконати зміни традиційної структури (рис. 2, а) у вигляді об'єднання складів і відповідного розподілення потоків на сортувальні станції (рис. 2, б), встановити робот-маніпулятор укладач готових виробів на склад (рис. 2, в). Середній період виходу готової продукції і її загальна кількість показана як аналіз статистики у властивостях складу імітаційної моделі на рис. 2, г.

Для аналізу у реальному часі виробництва традиційної технологічної схеми застосовано об'єкт-індикатор властивостей, що будує діаграму статистики стану робочих станцій. В таблиці 1 наведено порівняння станів центральної гілки складальної лінії руху корпусу карбюратора (станції Proc1-5) та станцій складання лівої і правої гілок Assembly (6 шт.), що застосовані для складання до кришки карбюратора, корпусу дросельних заслінок і ін.

Порівняння виконано під час 5-хвилинного часу симуляції традиційної лінії без застосування буферів як міжопераційних накопичувачів (перший стовпчик табл. 1) і з буферами ємністю 500 деталей кожний (перший стовпчик табл. 1). Під час імітаційного експерименту виявлено різну завантаженість та час очікування і блокування робочих станцій, що напряму залежить не тільки від наявності міжопераційних накопичувачів (буферів), а й від максимальної кількості деталей в буфері (максимальна завантаженість). На рис. 3 наведено вікно статистики окремого буферу імітаційної моделі як приклад.

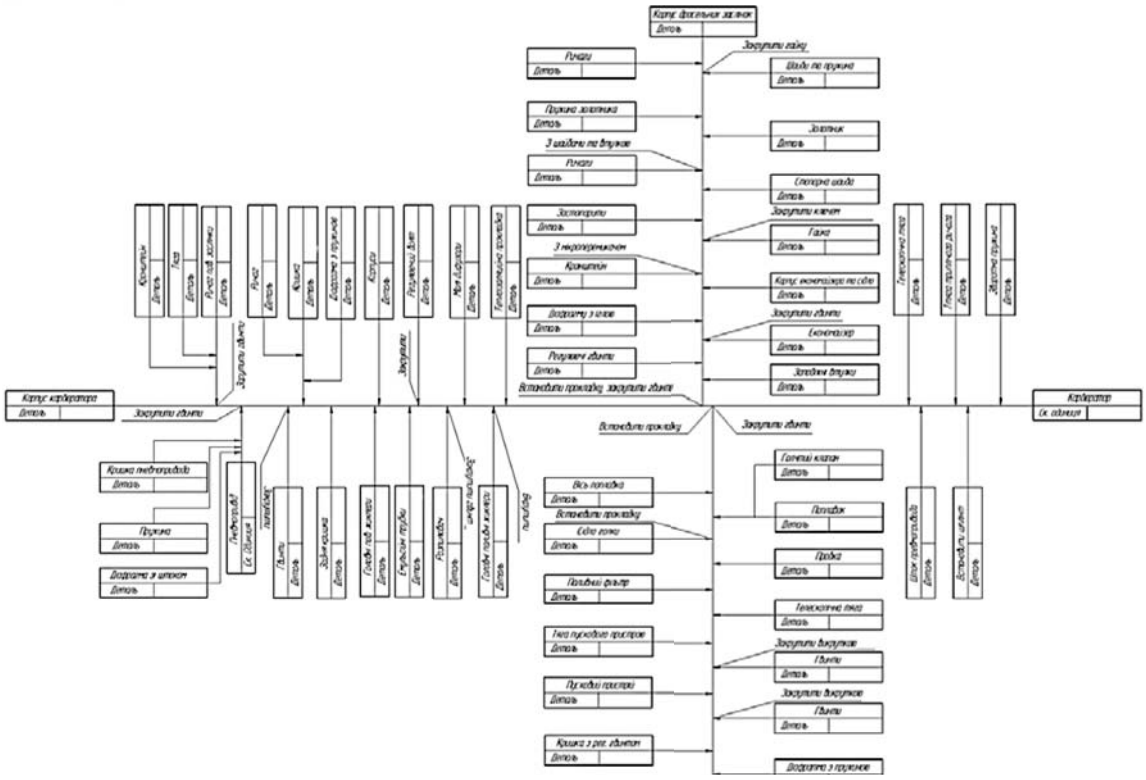
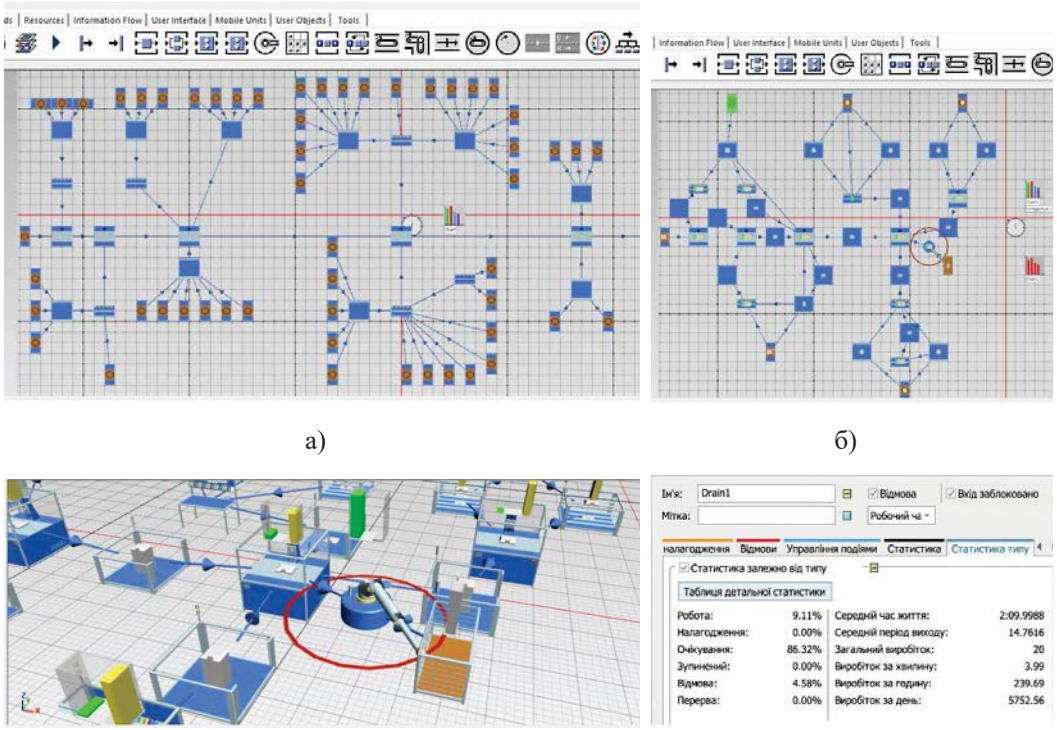


Рис. 1. Технологічна схема складання карбюратора для двигунів малої потужності



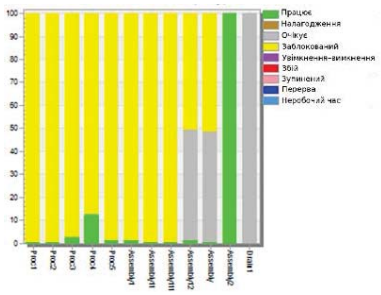
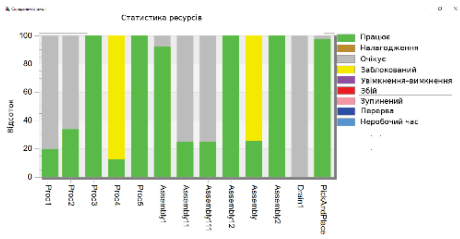
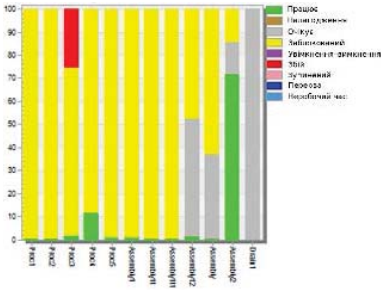
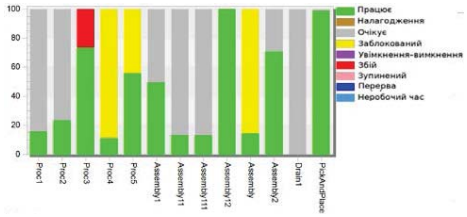
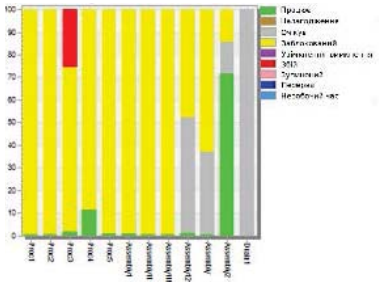
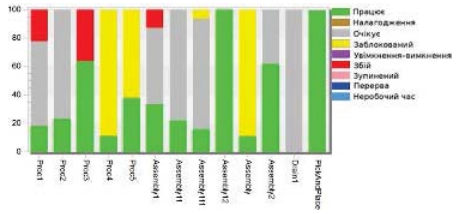
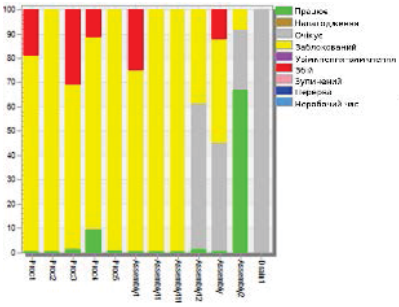
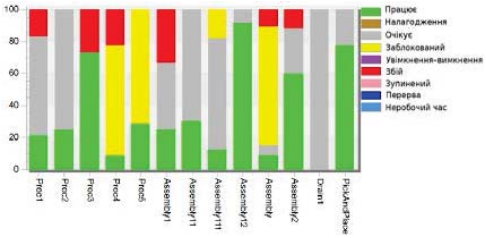
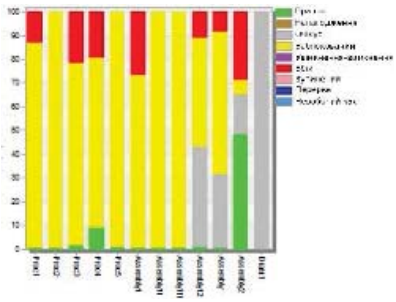
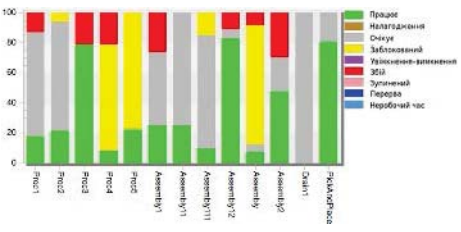
а) б)

в) г)

Рис. 2. Імітаційна модель традиційної структури виробничої дільниці (а), імітаційна модель модернізованої дільниці (б), маніпулятор укладач на склад (в) і статистика роботи складу імітаційної моделі модернізованої автоматизованої дільниці (г)

Таблиця 1

Порівняння завантаженості робочих станцій на протязі роботи 5 хв.

Час роботи, хв	Структура лінії без міжопераційних накопичувачів	Структура лінії з міжопераційними накопичувачами ємністю 500 деталей
1,0		
2,0		
3,0		
4,0		
5,0		

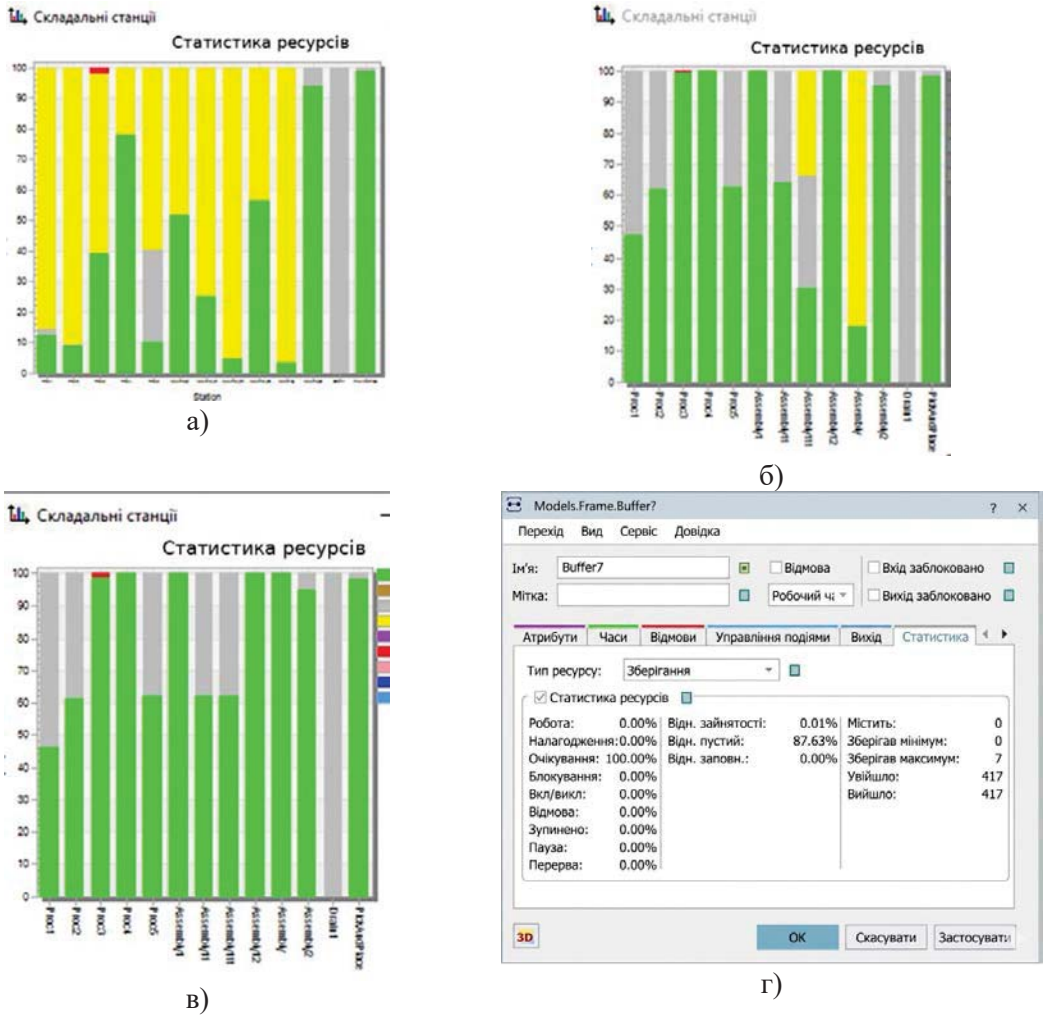
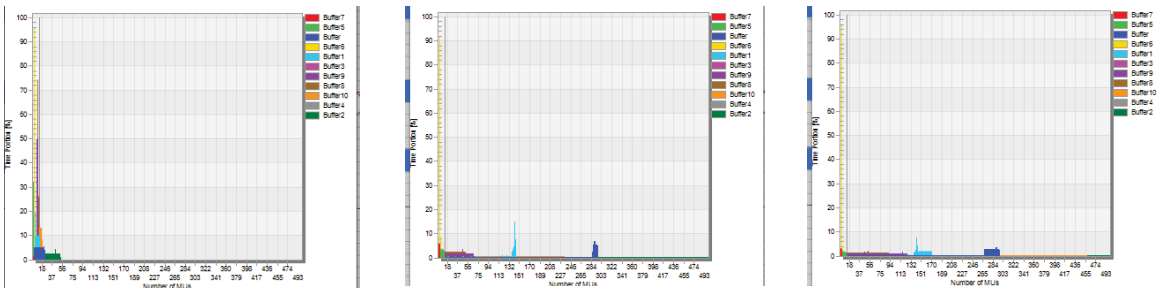


Рис. 3. Статистика ресурсів робочих станцій з різним об'ємом міжопераційних накопичувачів на 1 хв. 30 секунді роботи автоматизованої дільниці: а) накопичувачі ємністю 50 деталей; б) накопичувачі ємністю 500 деталей; в) накопичувачі ємністю 5000 деталей; г) вікно статистики роботи на окремому моменті часу об'єкту «Буфер імітаційної моделі виробничої лінії»

Програмне середовище Siemens Tecnomatix Plant Simulation дозволяє оцінити у реальному часі роботи імітаційної моделі завантаженість кожного міжопераційного буферу і встановити його необхідну ємність (рис. 4).



1 секунда роботи 30 секунд роботи 1 хвилина роботи

Рис. 4. «Зріз» кількості деталей у міжопераційних буферах під час роботи імітаційної моделі автоматичної лінії складання карбюратора

Найбільш «проблемними» місцями у традиційній схемі складання визначено Буфер 0 (ліва гілка приєднання дифузорів) та Буфер 2 (права гілка приєднання деталей до кришки карбюратора), заповнення яких зростає дуже швидко і досягає для буферу 2 кількості у декілька тисяч (рис. 4). Дана обставина вимагає структурної і параметричної оптимізації гілок з Буферами за номером 0 і 2.

Продуктивність автоматичної лінії визначається надійністю обладнання, яку в імітаційній моделі задано параметрами відмов або доступністю у відсотках. В імітаційній моделі традиційної структури без міжопераційних буферів і при вірогідності відмов до 20% виробітка складала 240 вузлів за годину, а за наявності міжопераційних буферів виробітка досягла 252 вузла. При зменшенні збоїв у складальних станціях до 5% і 2,5% виробітка збільшилась до 287 і до 282 вузлів відповідно. Проведений аналіз технологічної схеми дає комплексне уявлення про якість автоматичної дільниці за досить короткий час і надає можливості оптимізації як структури дільниці, так і параметрів обладнання складальних станцій і допоміжного устаткування.

Висновки

Згідно традиційної технологічної схеми і операційних карт побудовано імітаційну модель автоматизованої дільниці складання карбюратора ДВЗ в середовищі Tecnomatix Plant Simulation від Siemens PLM Software з фактичними значеннями штучного часу, надійності, пропускної здатності. Проведено віртуальний експеримент завантаженості складальних станцій за традиційною технологічною схемою на прикладі складання карбюратора без міжопераційних накопичувачів і за їх наявності. Встановлено розмір накопичувачів, необхідний для рівномірної завантаженості складальних станцій та виконано дослідження залежності матеріальних потоків від ступеню надійності, що задавався окремо для сортувальних і складальних станцій від кількості складальних одиниць на кожній станції.

Список використаної літератури

1. Воронцов Б. С. Впровадження імітаційного моделювання логістики технологічних процесів в навчальний процес // Форум інженерів-механіків XXI : МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». 2020. С. 231–237. DOI: https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.210762

2. Riera B., Emprin F., Annebicque D., Colas M., Vigario B. HOME I/O: a virtual house for control and STEM education from middle schools to universities. IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, No. 6. P. 168–173. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.172

3. Пальчевський Б. О., Крестьянполь О. А., Валецький Б. П., Бондарчук Д. В., Рак В. С. Основи САПР пакувального обладнання: навч. посіб. / за ред. Б. О. Пальчевського. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2008. 160 с.

4. Afizul N. A., Pagan N., Ng K. Y. Modelling an Assembly Line Using Tecnomatix Plant Simulation Software // *Research in Management of Technology and Business*. 2024. Vol. 5, No. 1. P. 1048–1055. DOI: https://doi.org/10.30880/rmtb.2024.05.01.071

5. Дмитрієв Д. О., Русанов С. А., Омельчук А. А., Федорчук Д. Д. Розробка технічних засобів проектування технологічного і верстатного обладнання каркасних просторових компоновок. Mechanics and Advanced Technologies. 2017. № 3 (81). С. 54–62. DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.112783.

6. Plinta D., Krajčovič M. Production system designing with the use of digital factory and augmented reality technologies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. Vol. 350. P. 187–196. ISSN 2194-5357.

7. Омельчук А. А., Дмитрієв Д. О., Русанов С. А., Лебеденко Ю. О. Моделювання технологічних процесів за допомогою програмного середовища FACTORY I/O // Прикладні питання математичного моделювання. 2019. Т. 2, № 2. С. 58–64. DOI: https://doi.org/10.32782/2618-0340/2019.2-2.5

8. Snyman S., Bekker J. Real-time scheduling in a sensorised factory using cloud-based simulation with mobile device access // The South African Journal of Industrial Engineering. 2017. Vol. 28, No. 4. P. 161–169. DOI: https://doi.org/10.7166/28-4-1860.

9. Phanindra Kshatra D., Ratna Prasad P., Kalamulla M. D., Sai Krishna P. Analyze the production system of a body-in-white system through modelling and perform bottleneck optimization using simulation software // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 8. P. 685–690. DOI: https://doi.org/10.35940/ijrte.B1137.0782S419

10. Philippot A. et al. HOME I/O and FACTORY I/O: two pieces of innovative PO simulation software for automation education // Proceedings of the 27th EAEEIE Annual Conference (EAEEIE). Grenoble, France, June 7–9, 2017. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/EAEEIE.2017.8768639

11. Cai H., Wan J., Chen B., Zhang C., Zhang W. Active monitoring of production status in discrete manufacturing workshops driven by digital twins // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 135. P. 1433–1448. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-024-14578-5

12. Lidberg S., Aslam T., Pehrsson L., Ng A. H. C. Optimizing real-world factory flows using aggregated discrete event simulation modelling // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2020. Vol. 32. P. 888–912. DOI: https://doi.org/10.1007/s10696-019-09362-7

13. Сапон С. П., Данильченко Ю. М., Петраков Ю. В., Охріменко О. А. Цифрові двійники в металообробці: термінологія і проблематика // Сучасні технології промислового комплексу – 2024 : матеріали VIII міжнародної

науково-практичної конференції (17–19 вересня 2024 р., Херсон, Хмельницький) / за ред. Д. О. Дмитрієва. Херсон : ФОП Вишемирський В.С., 2024. С. 215–217. URL: http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014 (дата звернення: 17.04.2026).

14. Tecnomatix Plant Simulation: Compact Student Training. Siemens PLM Software, 2017. 177 p.

15. Воронцов Б. С., Бочарова І. А. Імітаційне моделювання механоскладального виробництва // Нові технології в машинобудуванні. Харків : Планета-Прінт, 2021. С. 38–39.

References

1. Vorontsov, B. S. (2020). Implementation of simulation modelling of logistics of technological processes in the educational process. In *Forum of Mechanical Engineers of the XXI Century: International Scientific and Technical Conference "Progressive Engineering, Technology and Engineering Education"* (pp. 231–237). https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.210762

2. Riera, B., Emprin, F., Annebicque, D., Colas, M., & Vigario, B. (2016). HOME I/O: A virtual house for control and STEM education from middle schools to universities. *IFAC-PapersOnLine, 49* (6), 168–173. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.172

3. Palchevskyi, B. O., Krestiianpol, O. A., Valetskyi, B. P., Bondarchuk, D. V., & Rak, V. S. (2008). *Fundamentals of CAD for packaging equipment***.** Lutsk: RVV LNTU.

4. Afizul, N. A., Pagan, N., & Ng, K. Y. (2024). Modelling an assembly line using Tecnomatix Plant Simulation software. *Research in Management of Technology and Business, 5* (1), 1048–1055. https://doi.org/10.30880/rmtb.2024.05.01.071

5. Dmitriev, D. O., Rusanov, S. A., Omelchuk, A. A., & Fedorchuk, D. D. (2017). Development of technical means for designing technological and machine equipment of frame spatial configurations. *Mechanics and Advanced Technologies, 3* (81), 54–62. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.112783

6. Plinta, D., & Krajčovič, M. (2016). Production system designing with the use of digital factory and augmented reality technologies. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 350, pp. 187–196). Springer.

7. Omelchuk, A. A., Dmitriev, D. O., Rusanov, S. A., & Lebedenko, Yu. O. (2019). Modelling technological processes using FACTORY I/O software environment. *Applied Problems of Mathematical Modelling, 2* (2), 58–64. https://doi.org/10.32782/2618-0340/2019.2-2.5

8. Snyman, S., & Bekker, J. (2017). Real-time scheduling in a sensorised factory using cloud-based simulation with mobile device access. *The South African Journal of Industrial Engineering, 28* (4), 161–169. https://doi.org/10.7166/28-4-1860

9. Kshatra, D. P., Prasad, P. R., Kalamulla, M. D., & Sai Krishna, P. (2019). Analysis of a production system of a body-in-white system through modelling and bottleneck optimization using simulation software. *International Journal of Recent Technology and Engineering, 8*, 685–690. https://doi.org/10.35940/ijrte.B1137.0782S419

10. Philippot, A., et al. (2017). HOME I/O and FACTORY I/O: Two pieces of innovative PO simulation software for automation education. In *Proceedings of the 27th EAEEIE Annual Conference* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/EAEEIE.2017.8768639

11. Cai, H., Wan, J., Chen, B., Zhang, C., & Zhang, W. (2024). Active monitoring of production status in discrete manufacturing workshops driven by digital twins. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 135*, 1433–1448. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14578-5

12. Lidberg, S., Aslam, T., Pehrsson, L., & Ng, A. H. C. (2020). Optimizing real-world factory flows using aggregated discrete event simulation modelling. *Flexible Services and Manufacturing Journal, 32*, 888–912. https://doi.org/10.1007/s10696-019-09362-7

13. Sapon, S. P., Danylchenko, Yu. M., Petrakov, Yu. V., & Okhrimenko, O. A. (2024). Digital twins in metalworking: Terminology and issues. In D. O. Dmitriev (Ed.), *Modern Technologies of the Industrial Complex – 2024: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference* (pp. 215–217). FOP Vyshemyrskyi V. S. http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014

14. Siemens PLM Software. (2017). *Tecnomatix Plant Simulation: Compact student training*. Siemens.

15. Vorontsov, B. S., & Bocharova, I. A. (2021). Simulation modelling of mechanical assembly production. In *New Technologies in Mechanical Engineering* (pp. 38–39). Planet-Print.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026