

Таран І.О., Литвин В.В., Клименко І.Ю.

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ СТЕЛАЖІВ
У СЕРЕДОВИЩІ ANYLOGIC**

Робота присвячена обґрунтуванню заходів щодо збільшення ємності зони зберігання та підвищення продуктивності сучасних складських комплексів методами імітаційного моделювання. На підставі аналізу останніх досліджень було встановлено, що визначальним чинником, який впливає на продуктивність складських систем, собівартість зберігання і обробки замовлень є організація оптимальної системи зберігання. На сьогодні більшість складів, які розташовані в Україні та країнах Європейського союзу, у зоні зберігання обладнані фронтальними стелажами. Головним недоліком фронтальних стелажів є низький ступінь використання загальної площі складу, у зв'язку із необхідністю розташування широких проїздів між ними для руху навантажувально-розвантажувальної техніки. Одним із ефективних рішень, щодо збільшення ємності зони зберігання без капітальної перебудови самої споруди складу, є заміна фронтальних стелажів на більш продуктивні та прогресивні системи зберігання.

У якості об'єкта дослідження був обраний сучасний складський комплекс, який розташований у м. Дніпро. Керівництвом терміналу було прийнято рішення переобладнати зону зберігання складу замінивши фронтальні стелажі на гравітаційні. Такий захід дозволить зменшити загальну площу зони зберігання з 7 766,4 м² до 3 575,8 м² та вивільнити певну кількість навантажувачів. Для оцінки ефективності застосування гравітаційних стелажів та обґрунтування раціональних параметрів такої системи, була розроблена імітаційна модель складу у середовище AnyLogic, яка складається з 130 блоків.

В результаті реалізації імітаційного експерименту (який складається з 27 прогонів моделі) були встановлені 6 варіантів організації роботи складу, що забезпечують опанування добових вантажопотоків. Для вибору найкращого варіанту запропонована структура критерію, який враховує кількість навантажувачів, середній коефіцієнт їх використання, а також середню тривалість навантаження та розвантаження автомобілів.

Ключові слова: складський комплекс, зона зберігання, гравітаційний стелаж, імітаційне моделювання, AnyLogic, критерій ефективності.

ВСТУП

На сьогодні більшість складів, які розташовані в Україні та країнах Європейського союзу, у зоні зберігання обладнані фронтальними стелажами (Pallet racks). Порівняно з іншими стелажними системами, складське обладнання фронтального типу відрізняється низькими капітальними інвестиціями та забезпечує швидкий і простий доступ до будь-якої палети з товаром. Головним недоліком фронтальних стелажів є низький ступінь використання загальної площі складу, у зв'язку із необхідністю розташування широких проїздів між ними для руху навантажувально-розвантажувальної техніки. У разі використання універсальних фронтальних навантажувачів (Forklift) ширина таких проходів повинна становити 3,1...3,4 м; ричтраків (Reach truck) – 2,8 м; вузькопрохідних штабелерів – 1,7 м. Наявність проходів такої ширини призводить до того, що корисна площа складу, яка безпосередньо задіяна для зберігання товарів становить 30-40%. Таким чином, тотальне використання фронтальних стелажів призводить до необхідності будівництва додаткових складських потужностей, що в свою чергу суттєво збільшує витрати логістичних операторів та відповідно кінцевих споживачів. Одним із ефективних рішень, щодо збільшення ємності зони зберігання без капітальної перебудови самої споруди складу, є заміна фронтальних стелажів на більш продуктивні та прогресивні системи зберігання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ефективність функціонування будь-якого сучасного складського комплексу безпосередньо залежить від раціональної організації вантажних потоків у зонах зберігання та експедиції [1]; системи під'їзних шляхів та параметрів навантажувально-розвантажувального фронту [2]; технологічного обладнання, яке використовується, а також його експлуатаційних та функціональних можливостей [3].

В рамках вирішення задач складської логістики, основними напрямками для досліджень є: підвищення швидкості обробки продукції та обсягів зберігання [4], дотримання термінів реалізації продукції за принципом FIFO [5], оптимізація розміщення товарів [6], автоматизація системи контролю та пошуку товарів [7], інтеграція задач зберігання та комплектування замовлень [8], вдосконалення системи охорони праці [9], оптимізації кількості навантажувально-розвантажувальної механізмів [10]. Але думку багатьох дослідників [11-12] визначальним чинником, який впливає на продуктивність складських систем та собівартість зберігання та обробки замовлень є вибір і організація оптимальної системи зберігання. Окрім фронтальних стелажів на сучасних складах використовуються набивні (Drive-in), мобільні (Mobile pallet racking) та гравітаційні (Flow racks) стелажі [13].

Набивні палетні стеллажі є ефективним рішенням для зберігання однотипного вантажу великого об'єму. Головною особливістю даної конструкції є відсутність проходів між стеллажами, що дозволяє максимально використовувати корисну площу зони зберігання (до 80%). Обробка вантажу може реалізовуватися двома принципами. Перший, за принципом LIFO (Last In, First Out): товар завантажується і вивантажується з однієї сторони, така система використовується на складах з великим об'ємом товару тривалого зберігання. Другий, за принципом, FIFO (First In, First Out), при цій схемі з однієї сторони відбувається завантаження стеллажа, з протилежної – вивантаження. Основними перевагами набивних стеллажів є низькі початкові інвестиції, оптимальне використання зони зберігання та два принципи організації вантажообігу. До недоліків слід віднести можливість зберігання лише однотипних вантажів та повільний вантажообіг [14].

Мобільні стеллажі – це стелажна система, яка сконструйована на базі фронтальних стеллажів, які встановлені на мобільних (пересувних) основах. Головними елементами такої конструкції є: рейкові направляючі, які інтегровані у підлогу; мобільні візки; фронтальні стеллажі; модулі безпеки та управління. Для отримання доступу до певної секції стеллажу за допомогою електродвигунів відбувається переміщення одного або декілька стелажних рядів (секцій). За рахунок подібної конструкції мобільні стеллажі характеризуються компактністю зберігання, економією складського простору та зручністю використання. Вони дозволяють збільшити місткість зони зберігання в 1,5-2 рази у порівнянні із стандартними фронтальними стеллажами [15].

Гравітаційні стеллажі – це стелажні системи, які використовуються для складування продукції на роликівих доріжках, які розташовані під кутом 3-5% до горизонту. Переміщення вантажу всередині каналу гравітаційного стеллажу (який може мати глибину до 35 м і більше) від місця встановлення до місця вивантаження здійснюється автоматично під дією сили тяжіння і не вимагає застосування вантажопідйомної техніки або витрат електроенергії. Гравітаційні стеллажі обслуговуються будь-якими моделями штабелерів або навантажувачів. Так само, як і в набивних стеллажах, гравітаційні стелажні системи не мають проходів між стеллажами, що дозволяє використовувати до 70-80% площі зони зберігання. Обробка вантажу здійснюється за принципом FIFO, який виконується автоматично. Використання гравітаційних стеллажів надає можливість розділити зони розвантаження та завантаження складу. Це дозволяє виконувати ці операції паралельно, що суттєво підвищує продуктивність виконуваних робіт. Скорочення відстаней пересування навантажувачів по складському приміщенню (до 40%) для відбору та комплектації заказів призводить до зменшення необхідної кількості вантажної техніки та скорочення штату обслуговуючого персоналу, що дозволяє не тільки підвищити пропускну здатність складу, але і суттєво знизити витрати на його експлуатацію [16]. Але у зв'язку із тим, що у зоні вивантаження є доступ лише до останнього піддону, така система підходить для зберігання відносно невеликого асортименту товарів [17].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є обґрунтування заходів щодо збільшення ємності зони зберігання та підвищення пропускну здатності сучасних складських комплексів методами імітаційного моделювання. У якості середовища для моделювання було обрано програмний продукт AnyLogic (розробник The AnyLogic Company), який є єдиною платформою для імітаційного моделювання будь-яких бізнес-систем і на сьогодні, широко використовується у 63 країнах світу [18].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У якості базового об'єкта дослідження був обраний складський комплекс класу А, який розташований у м. Дніпро. Склад обладнаний фронтальними стеллажами у зоні зберігання. Має по три доки навантаження та розвантаження. Протягом доби (з 8⁰⁰ до 18⁰⁰) на складі розвантажуються 24 єврофури місткістю 33 палети та навантажуються 48 автомобілів місткістю 16 палет, з середньою інтенсивністю прибуття та відправлення 3 і 6 авто/год. відповідно. Опанування зовнішніх та внутрішніх вантажопотоків здійснюють 20 навантажувачів. Основні параметри об'єкта дослідження наведені у роботі [19]. Загальна площа зони зберігання становить 7 766,4 м², з яких 5 618,9 м² займають проходи між стеллажами шириною 3,1 м. Коефіцієнт ефективності використання такої системи зберігання за (1) становить 0,28, що призводить до суттєвих витрат.

$$K = \frac{S_{Effective Area}}{S_{TotalArea}}, \quad (1)$$

де $S_{Effective Area}$ – корисна площа, на якій зберігаються палети із вантажем; $S_{TotalArea}$ – загальна площа зони зберігання.

Враховуючи відносно невеликий асортимент товарів, які зберігаються на складі керівництвом терміналу було прийнято рішення переобладнати зону зберігання складу замінивши фронтальні стелажі на гравітаційні. Такий захід дозволить зменшити загальну площу зони зберігання до 3 575,8 м², при цьому корисна площа становитиме 2 741,6 м², що дозволить збільшити коефіцієнт ефективності (1) з 0,28 до 0,77. Також скорочення відстаней пересування навантажувачів по складському приміщенню неодмінно призведе до зменшення необхідної кількості вантажної техніки. Для оцінки ефективності застосування гравітаційних стелажів та обґрунтування раціональних параметрів такої системи, було прийнято рішення розробити її імітаційну модель у середовище AnyLogic.

Аналіз структури технологічних процесів, які відбуваються на складах в результаті обробки зовнішніх та внутрішніх вантажопотоків дозволяє зробити висновок, що процес, який моделюється, необхідно представити у вигляді стохастичної багатофазної багатоканальної системи масового обслуговування замкнутого типу з обмеженою вхідною ємністю. Першим етапом розробки імітаційної моделі складу у середовище AnyLogic є створення транспортної мережі для руху автомобілів та навантажувачів за допомогою елементів *Space Markup*, таких як *Path*, *Point Node*, *Rectangular Node* та розміщення стелажів у зонах складу відповідно до його компоувальної схеми (Рис. 1) за допомогою елементу *Pallet Rack*. Другим етапом є завдання логіки роботи моделі за допомогою послідовності блоків, що входять до *складу Process Modeling Library*, та їх налаштування [19].

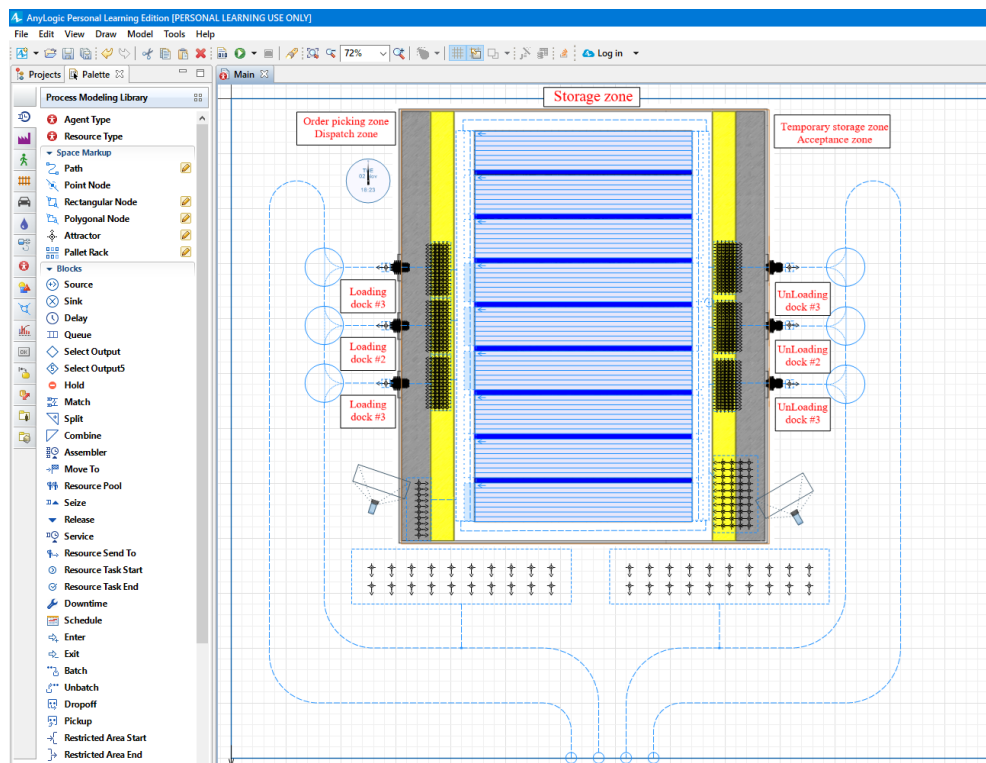








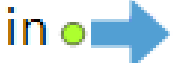




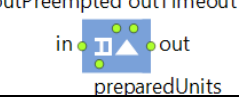
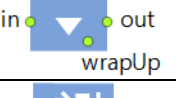






Рис. 1. Розробка транспортної мережі для переміщення автомобілів, навантажувачів та розміщення гравітаційних стелажів у складських зонах в середовищі AnyLogic

Логіка моделі у середовище AnyLogic задається графічно у вигляді послідовності блоків (що утворюють певний технологічний процес), кожен з яких являє собою окрему операцію, яка виконується відповідними агентами. Блоки бібліотеки *Process Modeling Library*, які були використані для завдання логіки роботи імітаційної моделі складу наведені у табл. 1, а сама модель, що складається з 130 блоків представлена на рис. 2.

Таблиця 1 – Блоки бібліотеки *Process Modeling Library*, які були використані для завдання логіки роботи імітаційної моделі складу з гравітаційними стелажими

Назва блоку	Умовне позначення	Опис функціоналу блоку
-------------	-------------------	------------------------

Source		Генерує агентів. Цей блок зазвичай є початковою точкою блок-схеми процесу
Sink		Знищує вхідних агентів. Цей блок зазвичай є кінцевою точкою блок-схеми процесу.
Queue		Створює чергу (буфер) агентів, які очікують на прийняття наступним блоком блок-схеми.
Delay		Затримує агентів на певний час.
Hold		Тимчасово блокує потік агента для наступної гілки блок-схеми процесу.
SelectOutput		Направляє вхідних агентів до одного з двох вихідних портів залежно від (ймовірнісної чи детермінованої) умови.
Combine		Чекає, поки два агенти прибудуть (у довільному порядку) на порти in1 і in2, створює новий агент і виводить його.
Batch		Перетворює кілька агентів в одного агента (пакет), відкидаючи оригінальні агенти та створюючи новий — постійний пакет
Exit		Вилучає вхідних агентів із потоку процесу та дозволяє користувачеві вказати, що з ними робити.
Enter		Вставляє (вже існуючих) агентів у певну точку блок-схеми процесу.
Move To		Переміщує агента на нове місце.
Restricted Area Start		Позначає вхід у області процесу, де ви бажаєте обмежити максимальну кількість агентів
Restricted Area End		Позначає вихід з області процесу, де ви бажаєте обмежити максимальну кількість агентів
Seize		Захоплює задану кількість одиниць ресурсу з заданого блоку (ів) ResourcePool
Release		Звільняє задану кількість одиниць ресурсу, раніше захоплених об'єктом Seize
Rack Store		RackStore розміщує агента в комірці певної палетної стійки або RackSystem
Rack Pick		RackPick видаляє агента з комірки у вказаному стелажі піддонів або RackSystem і переміщує його у вказане місце призначення.
Resource Pool		Визначає набір одиниць ресурсу. Ресурси - це об'єкти, необхідні агентам для виконання деяких завдань.
Rack System		RackSystem використовується для представлення кількох сховищ у вигляді єдиного блоку з кількома рядами та проходами та служить для них центральною точкою доступу та керування

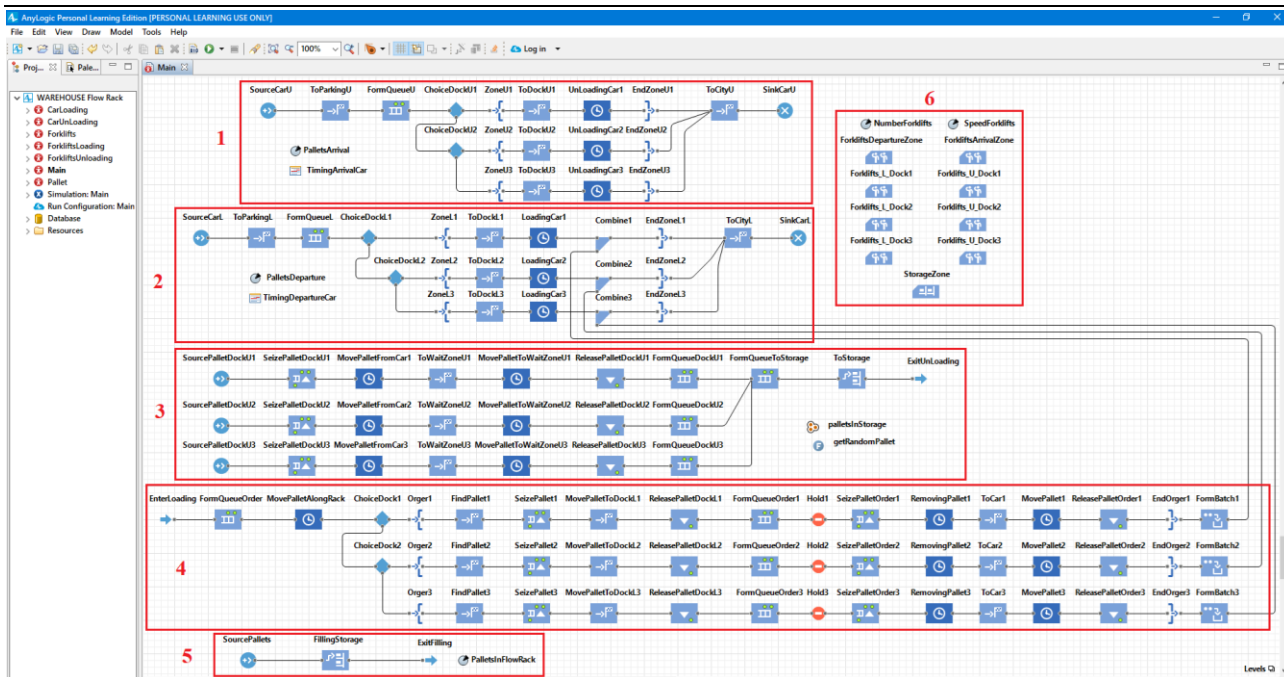


Рис. 2. Розроблена модель роботи складу з гравітаційними стелажами у середовище AnyLogic

Скорочення «U» та «L» у назвах блоків відповідають процесам, які пов'язані з процесами розвантаження (Unloading) та навантаження (Loading). Модуль №1 та модуль №2 реалізує процес прибуття автомобілів під розвантаження на навантаження (відповідно); модуль №3 – розвантаження піддонів та їх переміщення у зону зберігання; модуль №4 – переміщення піддонів з зони зберігання у зону навантаження; модуль №5 відповідає за створення піддонів, які складають страховий запас; а модуль №6 формує ресурси складу – зону зберігання та навантажувачі. Основною складністю з якою зіткнулися автори під час розробки моделі є відсутність у стандартній бібліотеці AnyLogic блоку, який модулює роботу гравітаційних стелажів, оскільки існуючий елемент *Rack System* дозволяє створювати моделі тільки із фронтальними стелажми. За відтворення коректної роботи гравітаційних стелажів відповідають блоки *MovePalletAlongRack*, *FindPallet*, *SeizePallet*, *MovePalletToDockL*, *ReleasePalletDockL* модуля 4 (Рис. 2). Наявність цих блоків відрізняє розроблену модель від моделі складу з фронтальними стелажми [19]. Будь-яка імітаційна модель складу може бути представлена у вигляді моделі чорної скрині (Рис. 3), що дозволяє досліджувати взаємини між його вхідними і вихідними параметрами.

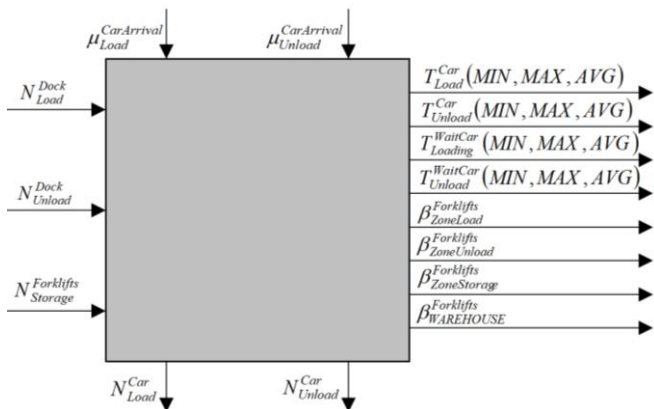


Рисунок 3 – Модель чорної скрині функціонування складського комплексу [19]
Умовні позначення, які наведені на рис. 3:

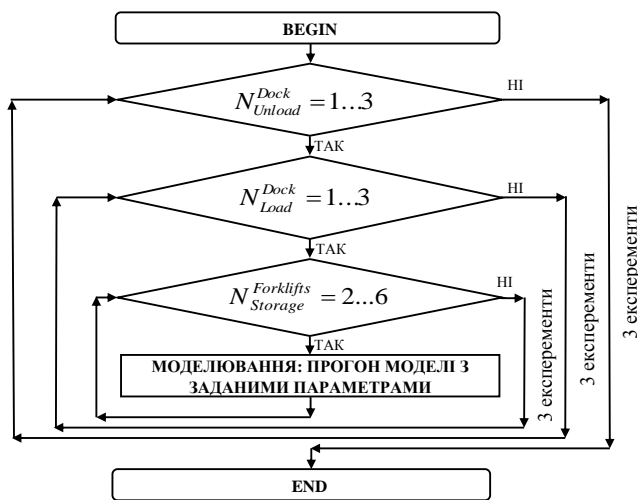


Рисунок 4 – Алгоритм постановки імітаційного експерименту

• вхідні параметри моделі: $\mu_{Load}^{CarArrival}$, $\mu_{Unload}^{CarArrival}$ – добові інтенсивності прибуття автомобілів під навантаження та під розвантаження, од.;

• вихідні параметрами моделі: N_{Load}^{Car} , N_{Unload}^{Car} – кількість завантажених та розвантажених автомобілів протягом доби, од.;

• параметри, які можуть варіюватися: N_{Load}^{Dock} , N_{Unload}^{Dock} – кількість на складі доків для завантаження та розвантаження, од.; $N_{Storage}^{Forklifts}$ – кількість навантажувачів у зоні зберігання, од.;

• параметри, які дозволяють оцінити ефективність системи: $\beta_{ZoneLoad}^{Forklifts}$, $\beta_{ZoneUnload}^{Forklifts}$, $\beta_{ZoneStorage}^{Forklifts}$, $\beta_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$ – коефіцієнти використання навантажувачів у зонах навантаження, розвантаження, зберігання та в середньому по складу (відповідно); $T_{Load}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$, $T_{Unload}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$, $T_{Load}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$, $T_{Unload}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$ – мінімальне, максимальне та середнє значення тривалості завантаження, розвантаження автомобілів, а також тривалості очікування відповідних операцій, хв.

Враховуючи той факт, що заміна фронтальних стелажів на гравітаційні дозволить зменшити зону зберігання з 7 766,4 м² до 3 575,8 м² необхідна кількість навантажувачів для її обслуговування є також меншою. Відповідно до самої конструкції гравітаційних стелажів та розробленої компонуванняльної схеми складу, авторами були зроблено припущення, що для опанування вхідних та вихідних вантажопотоків у зоні зберігання достатньо експлуатувати не більше 6 навантажувачів. Для підтвердження цієї гіпотези, а також визначення раціональних параметрів складу був розроблений алгоритм імітаційного експерименту, який наведено на рис. 4. Він складається із потрійного циклу, загальна кількість прорахунків моделі становила 27 варіанти. Деякі результати виконаного моделювання представлені на рис.5-6.

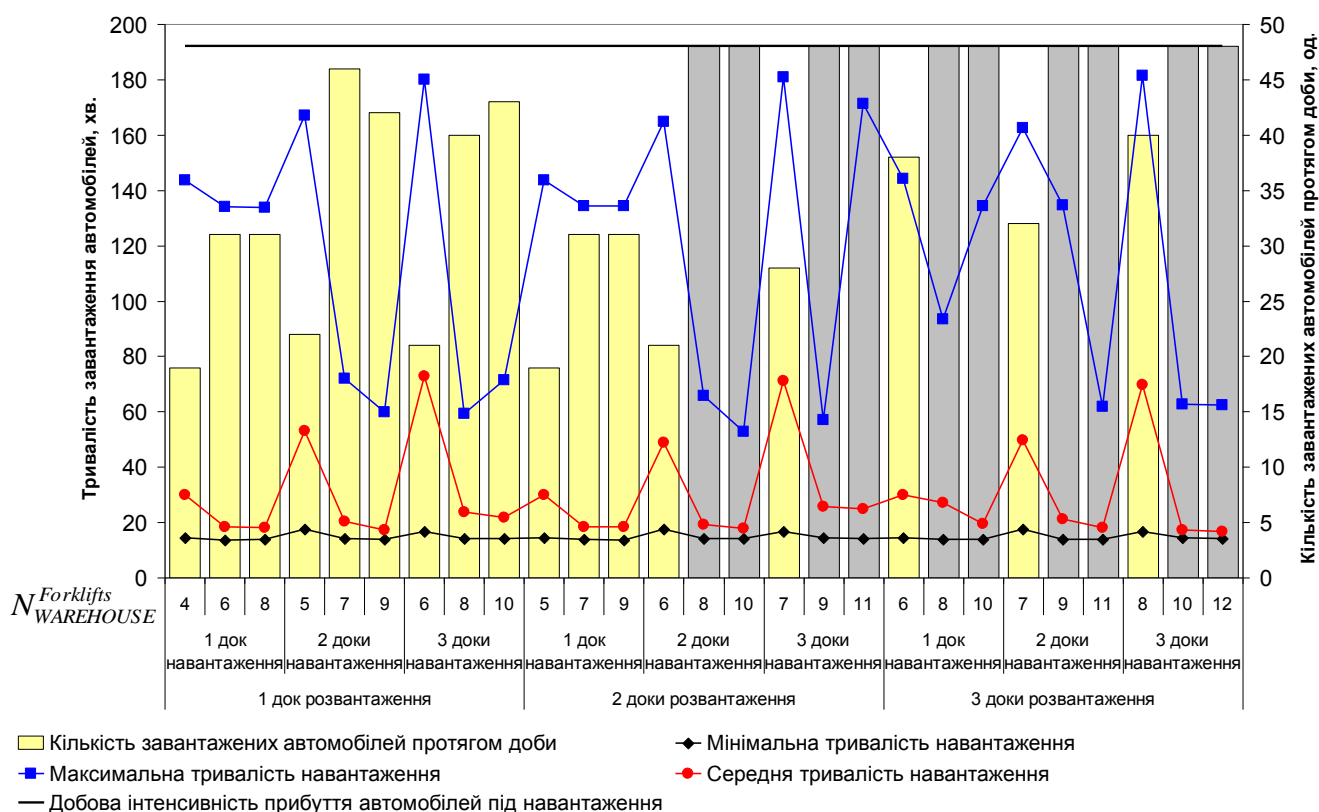


Рисунок 5 – Сумісний аналіз розподілу кількості завантажених автомобілів та тривалості навантаження

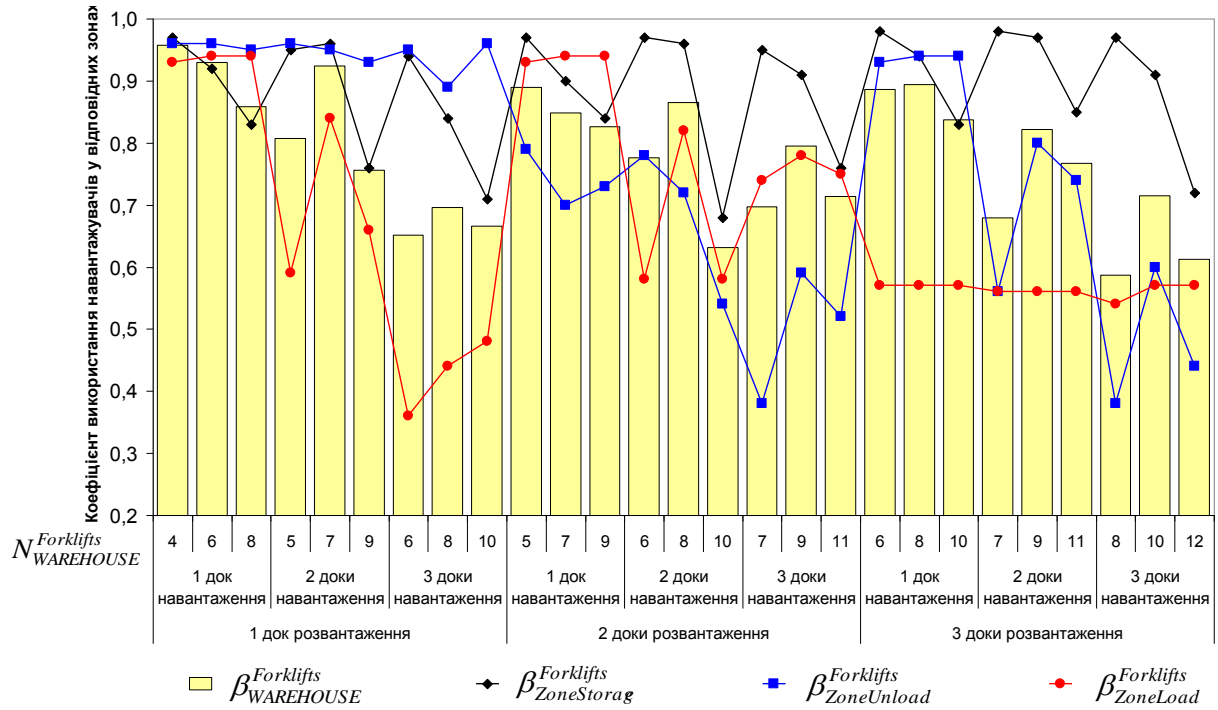


Рисунок 6 – Аналіз розподілу коефіцієнтів використання навантажувачів у відповідних зонах

Також на рисунках 5 та 6 наведені результати розрахунків кількості навантажувачів, які експлуатуються на складі протягом відповідного прорахунку моделі:

$$N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}} = N_{\text{Storage}}^{\text{Forklifts}} + N_{\text{Unload}}^{\text{Dock}} + N_{\text{Load}}^{\text{Dock}} \quad (2)$$

Аналіз результатів моделювання дозволив встановити 6 варіантів організації роботи складу, які забезпечують його функціонування відповідно до вхідних параметрів $\mu_{\text{Unload}}^{\text{CarArrival}} = 24$ та $\mu_{\text{Load}}^{\text{CarArrival}} = 48$ – це прогони моделі №20, №21, №23, 24, 26 та №27.

Для вибору оптимального варіанту експлуатації складу були обрані наступні показники роботи системи: $N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$; $\beta_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$; $T_{\text{Load}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$, $T_{\text{Unload}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$. Числові значення цих показників для відповідного прогону моделі наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Числові значення показників, які були обрані для подальшого дослідження

Показник	Значення показника						
	Гравітаційні стелажі						Фронтальні стелажі
Номер прогону	20	21	23	24	26	27	
Шифр прогону	3DU1DL8F	3DU1DL10F	3DU2DL9F	3DU2DL11F	3DU3DL10F	3DU3DL12F	3DU3DL20F
$N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$	8	10	9	11	10	12	20
$\beta_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$	0,89	0,84	0,82	0,77	0,72	0,61	0,69
$T_{\text{Unload}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$	48,7	48,1	49,1	49,2	34,4	34,0	33,1
$T_{\text{Load}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$	27,0	19,5	21,0	18,1	17,1	16,5	18,6

Умовне кодування шифру прогону: «3DU1DL8F»: на складі функціонують 3 доки розвантаження, 1 док навантаження та експлуатуються 8 навантажувачів.

Для оцінки ефективності варіантів роботи складу авторами запропоновано наступну структуру показника для комплексної оцінки:

$$K_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n k_i^j} \rightarrow \max, \quad (3)$$

де k_i^j – відносна величина j -го показника на i -му прогоні моделі; n – кількість показників, що враховуються.

З урахуванням обраних показників функціонал (3) набуває наступного вигляду:

$$K_i = \sqrt[4]{k_i^{N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}} \cdot k_i^{\beta_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}} \cdot k_i^{T_{\text{Unload}}^{\text{Car}}} \cdot k_i^{T_{\text{Load}}^{\text{Car}}} \rightarrow \max} \quad (4)$$

Відносні величини k_i^j відображають ступінь погіршення значення показника, який аналізується у порівнянні з найкращим значенням у групі:

$$k_i^j = \begin{cases} \frac{X_i^{j(\text{best})}}{X_i^j}, & \text{якщо } X_i^{j(\text{best})} = \min(X_i^j) \\ \frac{X_i^j}{X_i^{j(\text{best})}}, & \text{якщо } X_i^{j(\text{best})} = \max(X_i^j) \end{cases}, \quad (5)$$

де X_i^j – абсолютне значення j -го показника для i -го прогону моделі (табл. 2); $X_i^{j(\text{best})}$ – найкраще значення j -го показника для i -го прогону моделі.

Результати розрахунків відносних величин k_i^j за (5) та значень комплексного показника K_i , наведені у табл. 3 і на рис. 7.

Таблиця 2 – Результати розрахунків відносних величин k_i^j та комплексного показника K_i

Показник	Значення показника						
	Flow racks						Pallet racks
Номер прогону	20	21	23	24	26	27	
Шифр прогону	3DU1DL8F	3DU1DL10F	3DU2DL9F	3DU2DL11F	3DU3DL10F	3DU3DL12F	3DU3DL20F
$k(N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}})$	1,00	0,80	0,89	0,73	0,80	0,67	0,40
$k(\beta_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}})$	1,00	0,94	0,92	0,86	0,80	0,69	0,77
$k(T_{\text{Unload}}^{\text{Car}}(\text{AVG}))$	0,68	0,69	0,67	0,67	0,96	0,97	1,00
$k(T_{\text{Load}}^{\text{Car}}(\text{AVG}))$	0,61	0,85	0,79	0,91	0,96	1,00	0,89
K_i	0,80	0,81	0,81	0,79	0,88	0,82	0,72

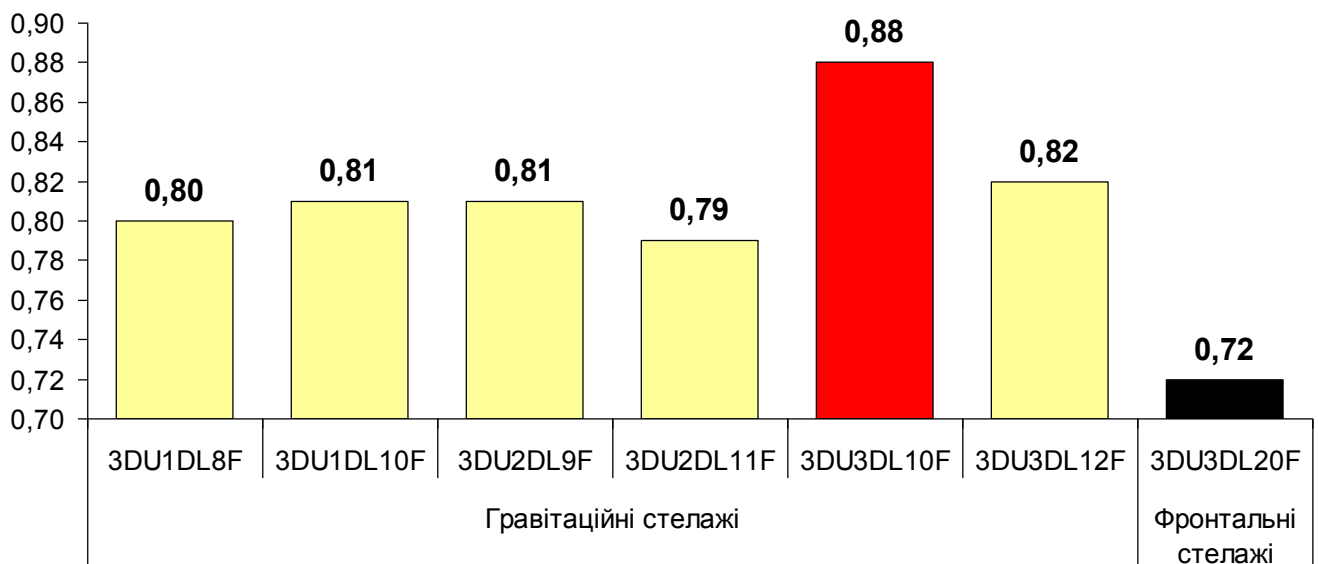


Рисунок 6 – Оцінка варіантів організації роботи складу з гравітаційними стелажимами

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз інформації, яка наведена у табл. та на рис. 7 дозволяє зробити висновок, що заміна фронтальних стелажів у зоні зберігання на гравітаційні дозволить вивільнити з роботи 10 навантажувачів (50%) та підвищити ефективність його роботи на 16% за запропонованим

комплексним критерієм. При цьому для опанування вхідних та вихідних вантажопотоків на складі необхідно залишити по 3 доки для навантаження ті розвантаження.

ВИСНОВКИ

Виконані дослідження дозволяють виявляти резерви підвищення ефективності функціонування складських комплексів за рахунок обґрунтування схеми організації зони зберігання та визначення раціональних параметрів складу. Доведено, що одним із ефективних рішень, щодо збільшення ємності зони зберігання без капітальної перебудови самої споруди складу, є заміна фронтальних стелажів на більш продуктивні системи зберігання, серед яких найбільш прогресивною є системи, що обладнана гравітаційними стелажимами. Враховуючи, що сучасний складський комплекс відноситься до складних систем, під час розробки або модернізації його роботи необхідно використовувати сучасні методи досліджень, одним із яких є імітаційне моделювання. Для оцінки ефективності застосування гравітаційних стелажів на типовому складі та обґрунтування раціональних параметрів такої системи, була розроблена імітаційна модель у середовищі AnyLogic, яка складається з 130 блоків. Враховуючи той факт, що заміна фронтальних стелажів на гравітаційні дозволить зменшити зону зберігання з 7 766,4 м² до з 3 575,8 м² необхідна кількість навантажувачів для її обслуговування є також меншою. Відповідно до самої конструкції гравітаційних стелажів та розробленої компонуванняльної схеми складу, авторами були зроблено припущення, що для опанування вхідних та вихідних вантажопотоків у зоні зберігання достатньо експлуатувати не більше 6 навантажувачів. Для підтвердження цієї гіпотези, а також визначення раціональних параметрів складу був розроблений алгоритм імітаційного експерименту, який складається із потрійного циклу, загальна кількість прорахунків моделі становила 27 варіанти. Результати виконаного моделювання дозволили встановити 6 варіантів функціонування складу, які забезпечують розвантаження та завантаження необхідної кількості автомобілів протягом доби. Для вибору оптимального варіанту експлуатації складського комплексу були обрані наступні показники роботи системи: $N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$; $\beta_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}}$; $T_{\text{Load}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$, $T_{\text{Unload}}^{\text{Car}}(\text{AVG})$ та запропонована структура комплексного показника. Результати виконаних розрахунків засвідчили, що заміна фронтальних стелажів на гравітаційні дозволить зменшити площу зони зберігання на 4 190,6 м² (або на 54%), вивільнити з роботи 10 навантажувачів (50%) та підвищити ефективність його роботи на 16% за запропонованим комплексним критерієм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. de Jesus Pacheco, D.A. & Møller Clausen, D. & Bumann, J. A multi-method approach for reducing operational wastes in distribution warehouses. *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 256. 108705. DOI 10.1016/j.ijpe.2022.108705.
2. Крикавський Є. Логістика та управління ланцюгами поставок / Є. Крикавський, О. Похильченко, М. Фертч – Львів: Вид-во Львів. політехніка, 2017.– 801 с.
3. Accorsi, R. & Manzini, R. & Maranesi, F. A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*. 2014. Vol. 65 (1). P. 175-186. DOI 10.1016/j.compind.2013.08.007.
4. Torabizadeh, M.; Noordin, M.; Ma'aram, A.; Shaharoun, A. 2020. Identifying sustainable warehouse management system indicators and proposing new weighting method. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119190.
5. Bouillard, A. 2022. Trade-off between accuracy and tractability of Network Calculus in FIFO networks. *Performance Evaluation*, 153, 102250.
6. Yener, F.; Yazgan, H. 2019. Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1-13.
7. Faveto, A.; Traini, E.; Bruno, G.; Lombardi, F. 2021. Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54 (1), 116-121.
8. Silva, A.; Coelho, L.; Darvish, M.; Renaud, J. 2020. Integrating storage location and order picking problems in warehouse planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 102003.
9. Tsopa, V.; Cheberiyachko, S.; Yavorska, O.; Deryugin, O.; Aleksiev, A. 2022. Improvement of the safe work system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 104-111.
10. Szalai, S.; Szívós, B.; Kurhan, D.; Németh, A.; Sysyn, M.; Fischer, S. 2023. Optimization of Surface Preparation and Painting Processes for Railway and Automotive Steel Sheets. *Infrastructures*, 8(2), 28.
11. Fischer, S. 2022. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101.

12. Calzavara, M.; Glock, Ch.; Grosse, E.; Persona, A.; Sgarbossa, F. 2017. Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 527-536.
13. Тридід О. М. Логістика: навч. посібник / О.М. Тридід [та ін.] – К.: Знання, 2008.– 566 с.
14. Faveto, A. & Traini, E. & Bruno, G. & Lombardi, F. Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54 (1). P. 116-121.
15. Baker, P & Canessa, M. Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 193 (2). P. 425-436. DOI 10.1016/j.ejor.2007.11.045.
16. Dotoli, M. & Epicoco, N. Falagario, M. & Costantino, N. & Turchiano, B. An integrated approach for warehouse analysis and optimization: A case study. *Computers in Industry*. 2015. Vol. 70. P. 56-69. DOI 10.1016/j.compind.2014.12.004.
17. Živičnjak, M. & Rogić, K. & Bajor, I. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 64. P. 215-223. DOI 10.1016/j.trpro.2022.09.026.
18. AnyLogic: simulation modelling for business. Available at: <https://www.anylogic.com/>.
19. Таран І.О. Оптимізація функціонування складського комплексу з фронтальними стелажками у середовищі anylogic / І.О. Таран, В.В. Литвин, І.Ю. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2023. – № 1(20). – С. 261–272.

REFERENCES

1. de Jesus Pacheco, D.A. & Møller Clausen, D. & Bumann, J. (2023). A multi-method approach for reducing operational wastes in distribution warehouses. *International Journal of Production Economics*, 256, 108705. DOI 10.1016/j.ijpe.2022.108705.
2. Krykavskiy Ye. & Pokhylchenko O. & Fertch M. (2017). Lohistyka ta upravlinnia lantsiuhamy postavok. Lviv: Vyd-vo Lviv. Politekhnik, 801. [in Ukrainian].
3. Accorsi, R. & Manzini, R. & Maranesi, F. (2014). A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*, 65 (1), 175-186. DOI 10.1016/j.compind.2013.08.007.
4. Torabizadeh, M. & Noordin, M. & Ma'aram, A. & Shaharoun, A. (2020). Identifying sustainable warehouse management system indicators and proposing new weighting method. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119190.
5. Bouillard, A. (2022). Trade-off between accuracy and tractability of Network Calculus in FIFO networks. *Performance Evaluation*, 153, 102250.
6. Yener, F. & Yazgan, H. (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1-13.
7. Faveto, A. & Traini, E. & Bruno, G. & Lombardi, F. (2021). Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54 (1), 116-121.
8. Silva, A. & Coelho, L. & Darvish, M. & Renaud, J. (2020). Integrating storage location and order picking problems in warehouse planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 102003.
9. Tsopa, V. & Cheberichko, S. & Yavorska, O. & Deryugin, O. & Aleksieiev, A. (2022). Improvement of the safe work system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 104-111.
10. Szalai, S. & Szívós, B. & Kurhan, D. & Németh, A. & Sysyn, M. & Fischer, S. (2023). Optimization of Surface Preparation and Painting Processes for Railway and Automotive Steel Sheets. *Infrastructures*, 8(2), 28.
11. Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101.
12. Calzavara, M. & Glock, Ch. & Grosse, E. & Persona, A. & Sgarbossa, (2017). Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 527-536.
13. Trydid O. M. ta in. (2008). Lohistyka: navch. posibnyk. K.: Znannia, 566. [in Ukrainian].
14. Faveto, A. & Traini, E. & Bruno, G. & Lombardi, F. (2021). Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54 (1), 116-121.
15. Baker, P & Canessa, M. (2009). Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*, 193 (2), 425-436. DOI 10.1016/j.ejor.2007.11.045.
16. Dotoli, M. & Epicoco, N. Falagario, M. & Costantino, N. & Turchiano, B. (2015). An integrated approach for warehouse analysis and optimization: A case study. *Computers in Industry*, 70, 56-69. DOI 10.1016/j.compind.2014.12.004.
17. Živičnjak, M. & Rogić, K. & Bajor, I. (2022). Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia*, 64, 215-223. DOI 10.1016/j.trpro.2022.09.026.
18. AnyLogic: simulation modelling for business. Available at: <https://www.anylogic.com/>.

19. Taran, I. & Litvin, V. & Klymenko, I. (2023). Optimization of the functioning of a warehouse complex with front shelves in the anylogic environment. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 1(20), 261–272. [in Ukrainian].

I. Taran, V. Litvin, I. Klymenko. Evaluation of the efficiency the application of gravity racks in the Anylogic environment.

This work is dedicated to the substantiation of measures aimed at increasing storage area capacity and enhancing the throughput of modern warehouse complexes through the application of simulation modeling methods. After analyzing recent studies, it was determined that the primary factor influencing warehouse system performance and the cost of storing and processing orders is the organization of an optimal storage system. Presently, the majority of warehouses in Ukraine and European Union countries are equipped with front racks in their storage areas. However, a significant drawback of front racks is their inefficient utilization of the total warehouse space, necessitating wide passages for the movement of loading and unloading equipment.

One effective solution to augment storage area capacity without major warehouse restructuring is the replacement of front racks with more efficient and progressive storage systems. Our research focuses on a modern warehouse complex located in Dnipro. The management of the facility has decided to convert the storage area by replacing front racks with gravity racks. This change will reduce the total storage area from 7,766.4 square meters to 3,575.8 square meters and will also lead to a reduction in the number of loaders required.

To evaluate the effectiveness of adopting gravity racks and to justify the optimal parameters of such a system, we developed a simulation model using the AnyLogic environment, comprising 130 components. The implementation of the simulation experiment, which includes 27 model runs, led to the identification of six different operational strategies for the warehouse, ensuring efficient handling of daily cargo flows.

To select the best operational strategy, we propose a criterion structure that takes into account factors such as the number of loaders, their average utilization, and the average duration of loading and unloading of vehicles.

Keywords: warehouse complex, storage area, gravity rack, simulation modeling, AnyLogic, efficiency criterion.

ТАРАН Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: taran7077@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3679-2519>.

ЛИТВИН Вадим Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: litvin.v.v.79@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-1572-9000>.

КЛИМЕНКО Ірина Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: klymenkoiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6263-0951>

Igor TARAN, Doctor of Science in Technology, Professor, Head of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: taran7077@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3679-2519>.

Vadim LITVIN, Candidate of Technical Science, associate professor of Transport Management Department Dnipro University of Technology, e-mail: litvin.v.v.79@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-1572-9000>.

Iryna KLYMENKO, Candidate of Technical Science, associate professor of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, e-mail: klymenkoiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6263-0951>.

DOI 10.36910/automash.v2i21.1226