

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

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна***ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СКЛАДСЬКОГО КОМПЛЕКСУ З ФРОНТАЛЬНИМИ СТЕЛАЖАМИ У СЕРЕДОВИЩІ ANYLOGIC**

Робота присвячена розв'язанню актуального наукового завдання щодо підвищення ефективності функціонування складських комплексів засобами імітаційного моделювання. На підставі аналізу останніх досліджень було встановлено, що основним критерієм ефективної роботи будь-якого складу є забезпечення необхідного вантажообігу при оптимальних витратах на обробку та зберігання товарів. Було доведено, що склади відносяться до складних систем, в яких можливість застосування традиційних методів пошуку оптимальних рішень є обмеженою, тому для обґрунтування управлінських рішень під час розробки або модернізації роботи складу необхідно використовувати сучасні методи досліджень. Одним із таких методів є імітаційне моделювання.

У якості об'єкта дослідження був обраний сучасний складський комплекс, який розташований у м. Дніпро. Для аналізу можливостей щодо підвищення надійності його роботи та зменшення капітальних та поточних витрат під час експлуатації була розроблена імітаційна модель у середовищі AnyLogic (розробник The AnyLogic Company). Розроблена модель складається з двох елементів. 1. Транспортна мережа для руху автомобілів, навантажувачів та розміщення стелажів у зонах складу відповідно до його компонентної схеми. 2. Діаграма процесів, яка представляє собою послідовність 114 блоків бібліотеки моделювання процесів AnyLogic, що задають логіку роботи складу.

Представлення розробленої імітаційної моделі у вигляді чорної скрині дозволяє досліджувати вплив вхідних та вихідних параметрів складу на ефективність використання його ресурсів. Був запропонований алгоритм імітаційного експерименту, який складається із потрійного вкладеного циклу варіювання основних параметрів складу: кількості доків для навантаження та розвантаження, а також кількості навантажувачів у зоні зберігання. Загальна кількість прорахунків моделі становила 63 варіанти. За результатами виконаного моделювання були встановлені 4 варіанти роботи складу, які забезпечують виконання його добового вантажообігу. Для підсумкової оцінки отриманих результатів запропоновано структуру комплексного критерію, який враховує загальну кількість навантажувачів, які експлуатуються на складі; середній коефіцієнт використання навантажувачів; середню тривалість завантаження та розвантаження автомобілів; середню тривалість очікування автомобілів під завантаженням та розвантаженням.

**Ключові слова:** склад, навантажувач, фронтальний стелаж, док, AnyLogic, імітаційна модель, постановка експерименту, критерій ефективності.

**ВСТУП**

Згідно з основною концепцією логістики, між виробництвом, транспортом і споживачами завжди повинні існувати складські об'єкти, які призначені для згладжування нерівномірних циклів виробництва, споживання і функціонування різних видів транспорту [1]. Сучасний склад – це складне технічне спорудження, яке складається із великої кількості взаємозалежних елементів, має певну структуру і виконує ряд функцій по перетворенню матеріальних потоків, а також накопиченню, переробці і розподілу вантажів між споживачами.

Проектування та організація роботи сучасного складського господарства це складний комплексний процес, який потребує системного підходу, залучення кваліфікованих спеціалістів та врахування багатьох факторів, які впливають на визначення параметрів території та складу, підбір обладнання та програмного забезпечення, розробку та впровадження технології переробки вантажів, тощо [2]. Тому для обґрунтування управлінських рішень під час розробки або модернізації роботи складу необхідно використовувати сучасні методи досліджень. Одним із таких методів є імітаційне моделювання. Робота присвячена аналізу впливу об'ємно-планувальних рішень та основних виробничих і технологічних параметрів сучасного складу на ефективність його функціонування.

**АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Критерієм ефективної роботи будь-якого складу є забезпечення необхідного вантажообігу товарів при оптимальних витратах на обробку та зберігання товарів. Слід пам'ятати, що склад кожної конкретної компанії покликаний вирішувати різні проблеми: в одному випадку це розміщення максимальної кількості вантажу в конкретному приміщенні [3], в іншому – забезпечення максимально вантажообігу [4], в третьому – оптимізація структури складських приміщень [5], в четвертому – скорочення операційних витрат [6]. Тому важливе місце у дослідженнях систем управління складом належить розробці ключових показників ефективності [7] та систем підтримки прийняття рішень для проектування та управління складськими системами [8].

У складських об'єктах матеріальні потоки перетворюються з динамічних в статичні і навпаки. Крім того, в системи зберігання і переробки матеріальні потоки входять з одними параметрами, а виходять з іншими. Під параметрами слід розуміти напруженість, потужність, ритмічність, структуру цих потоків, а також тип і спосіб упаковки продукції, час прибуття і відправлення транспортних партій і т.д. Якщо параметри матеріальних потоків на деяких ділянках транспортних мереж не потребують змін, то відпадає необхідність створення складів або трансформаційних центрів (які включають в себе кілька складських комплексів). По суті, не тільки трансформаційні центри, а й окремі склади утворюють своєрідні системи зберігання і переробки різного ступеня складності. Нерозуміння їх ролі і значення в управлінні потоковими процесами призводить до неефективної організації транспортних мереж [9], до недоліків в загальній системі виробництва, розподілу, фізичного переміщення і споживання продукції [10]. Еволюція логістики призвела також до того, що на додаток до традиційних функцій зберігання товарно-матеріальних запасів склади використовуються як пункти крос-докінгу [11].

Однією із головних задач під час проектування складського комплексу є організація оптимальної системи зберігання. Автори [12] стверджують, що незважаючи на важливість складування для обслуговування клієнтів та підтримання необхідного рівня витрат, комплексної універсальної методології проектування складів не існує. На етапі проведення аналізу літератури було встановлено, що сучасні дослідження складської логістики в основному спрямовані на: процес комплектації заказів та визначення місцезнаходження елемента [13], оптимізацію складських процесів [14], маршрутизацію збирачів замовлень [15], мінімізацію кількості навантажувачів та визначення розмірів парку транспортних засобів [16] для обслуговування складських операцій.

Для прийняття остаточного рішення під час переобладнання вже існуючих приміщень, або проектування нового необхідно сумісно враховувати особливості асортименту продукції та область застосування, переваги та недоліки існуючих схем організації зони зберігання. Прикладом такого підходу є робота [17], у якій проведено порівняльний аналіз складських процесів на вибраних кейсах трьох компаній. В основу покладено наступний алгоритм: аналізується поточний стан складської системи, вносяться пропозиції щодо оптимізації відповідно до виявлених вузьких місць і нарешті, проводиться порівняльний аналіз запропонованих пропозицій щодо оптимізації.

Виконаний аналіз свідчить, що сучасний складський комплекс відноситься до складних систем, оскільки включає в себе багато різних технологічних процесів, які суттєво відрізняються між собою. У складних системах можливість застосування традиційних методів пошуку оптимального рішення обмежена, оскільки слабо структуровані між собою задачі поєднують як кількісні, так і якісні залежності. Тому для пошуку та обґрунтування управлінських рішень під час розробки або модернізації роботи складу необхідно використовувати сучасні методи досліджень. Одним із таких методів є імітаційне моделювання.

### **ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою роботи є підвищення надійності роботи сучасних складських комплексів та зменшення капітальних та поточних витрат під час їх експлуатації, за рахунок розробки імітаційних моделей у середовищі AnyLogic.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити імітаційну модель складського комплексу, який було обрано для дослідження у середовищі AnyLogic.
2. Представити розроблену імітаційну модель у вигляді чорної скрині для оцінки можливості дослідження впливу вхідних та вихідних параметрів складу на ефективність використання його ресурсів.
3. Розробити алгоритм імітаційного експерименту та представити основні результати моделювання роботи складу.
4. Запропонувати структуру комплексного критерію для підсумкової оцінки отриманих результатів.

### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

У якості об'єкта дослідження був обраний складський комплекс класу А, який розташований у м. Дніпро. Склад обладнаний фронтальними стелажками у зоні зберігання. Має по три доки навантаження та розвантаження. Протягом доби (з 8<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup>) 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. Основні параметри об'єкту дослідження та його компоновальна схема наведена у табл. 1 та на рис. 1 відповідно.

Таблиця 1 – Основні параметри об'єкту дослідження

Показник	Значення
Середні добові зовнішні вантажопотоки по прибуттю та відправленню, т	273,44
Середня добова величина переробки вантажів на склад, т	1421,88
Годинна інтенсивність внутрішніх вантажопотоків, т/год.	66,65
Площа складського приміщення, м <sup>2</sup>	6 927,06
Число піддонів з вантажем, що зберігаються на складі, од.	11 020,00
Кількість навантажувачів, од.	20
Кількість доків розвантаження, од.	3
Середня кількість автомобілів, які розвантажуються протягом доби	24
Кількість доків навантаження, од.	3
Середня кількість автомобілів, які навантажуються протягом доби	48

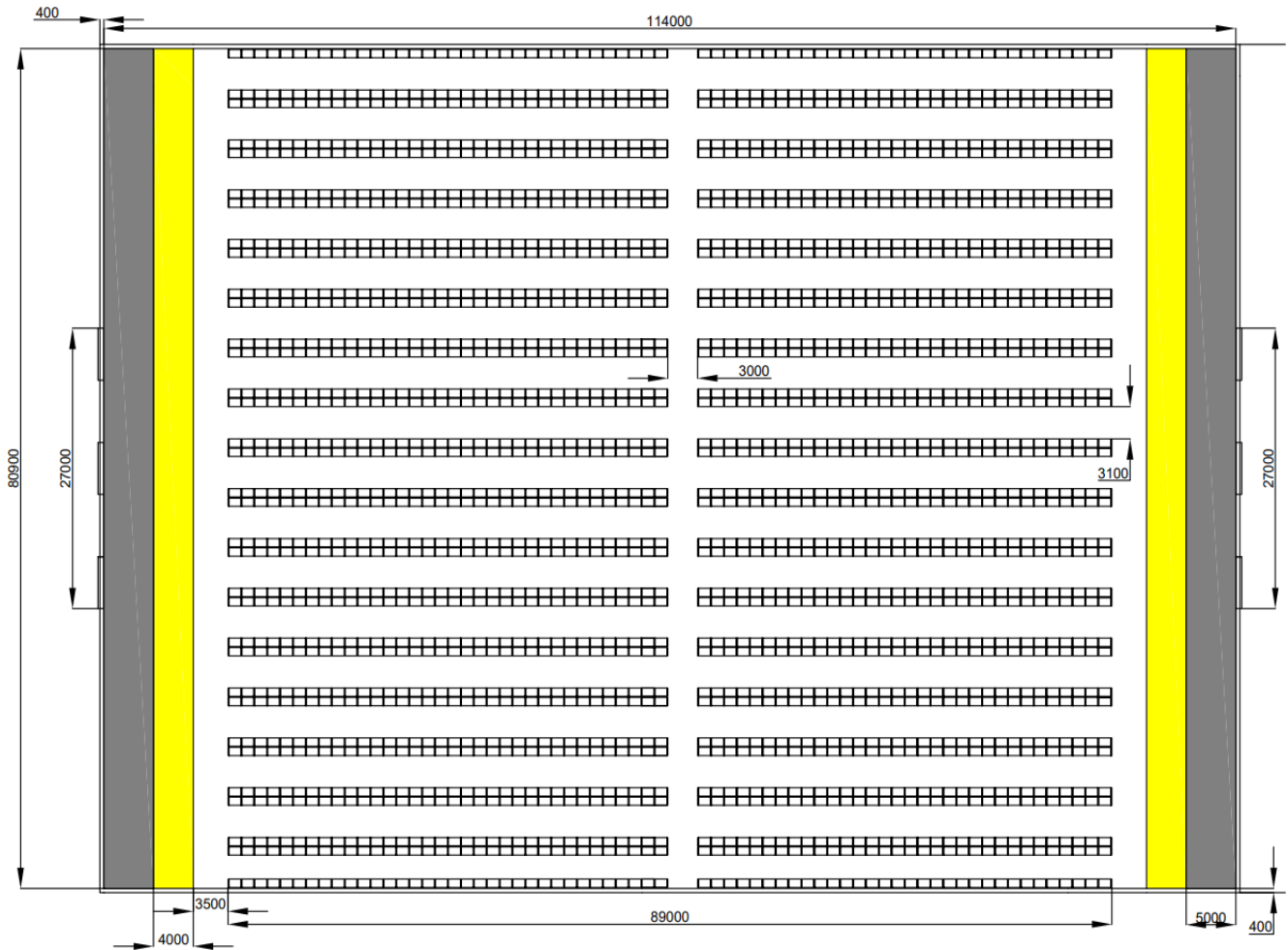


Рисунок 1 – Компонувальна схема об'єкту дослідження

За результатами технологічного аудиту складу, який був виконаний шляхом хронометражних спостережень були визначені коефіцієнти використання навантажувачів для відповідних зон (рис. 2).

Аналіз рис. 2 дозволяє зробити наступні висновки:

- значення коефіцієнтів використання навантажувачів розподіляються у діапазоні 0,41...0,92;
- середні значення коефіцієнтів використання навантажувачів у зоні зберігання становлять 0,76; у зоні розвантаження – 0,49; у зоні навантаження – 0,56;
- середньозважене значення коефіцієнтів використання навантажувачів загалом по складу становить 0,69.

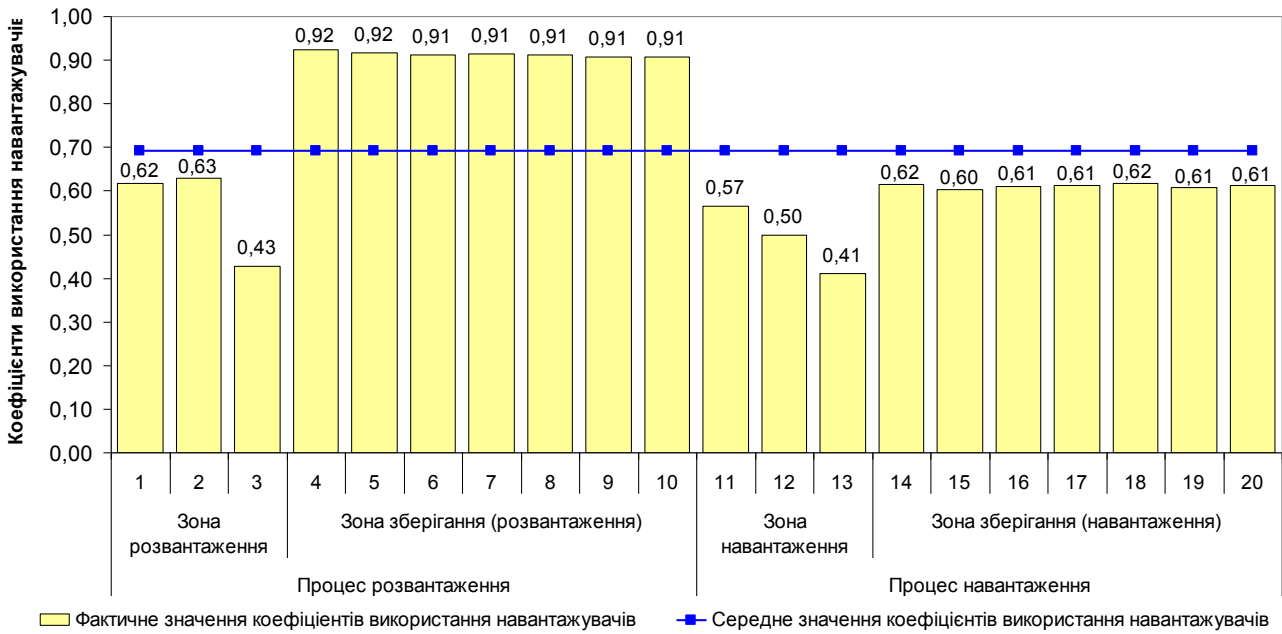


Рисунок 2 – Значення коефіцієнтів використання навантажувачів для відповідних зон складу

Таким чином, на об’єкті дослідження спостерігається недовикористання 31% основних виробничих потужностей, що призводить до підвищення витрат на їх експлуатацію та обслуговування та збільшення необхідної кількості обслуговуючого персоналу складу.

З огляду на стохастичний характер основних технологічних операцій, які відбуваються на складі (прибуття автомобілів та їх навантаження (розвантаження), розташування палет із вантажами у зоні зберігання, комплектація замовлень, тощо) керівництвом терміналу було прийнято рішення розробити імітаційну модель складського комплексу у середовище AnyLogic, яка дозволить у сьогоденних та майбутніх умовах:

- виявляти «вузькі» ділянки в роботі складу і знаходити рішення щодо їх ліквідації;
- оцінювати ефективність різних політик складування і зберігання товарів на складі;
- визначити оптимальний штат навантажувачів та інших складських ресурсів для ефективного функціонування складу в умовах нерівномірного графіка прибуття (відправлення) транспортних засобів.
- без ризику тестувати будь-яку гіпотезу, яка планується до реалізації.

Авторами був розроблений узагальнений алгоритм для створення імітаційних моделей складських комплексів, які обладнані фронтальними стелажми, у середовище AnyLogic (рис. 3).

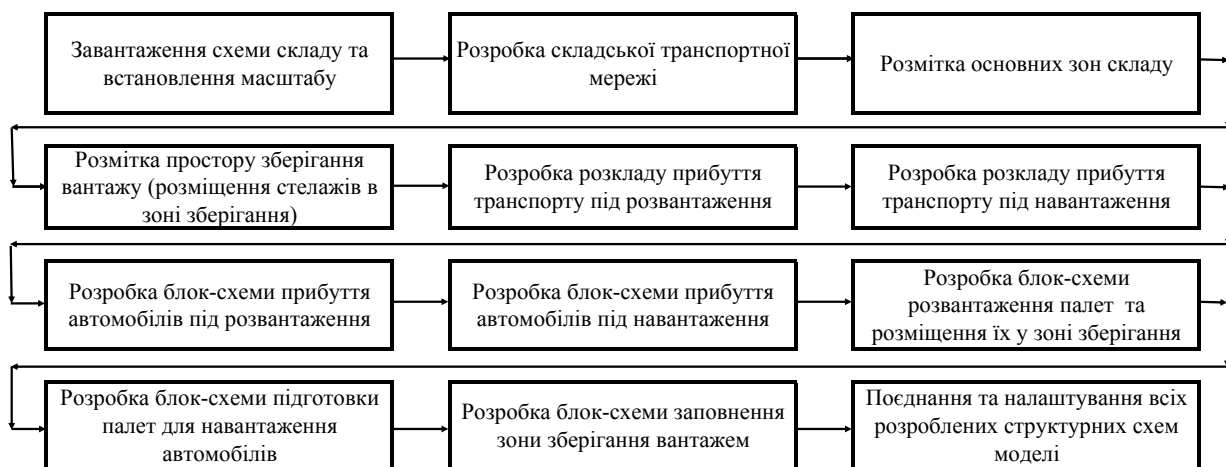


Рисунок 3 – Узагальнений алгоритм для створення імітаційних моделей складських комплексів, які обладнані фронтальними стелажми, у середовище AnyLogic

Взагалі розробку імітаційної моделі складу у середовище AnyLogic можна поділити на два етапи:

- за допомогою елементів розмітки простору (*Space Markup*), таких як *Path*, *Point Node*, *Rectangular Node* створення транспортної мережі для руху автомобілів, навантажувачів та розміщення стелажів у зонах складу (рис. 4) відповідно до його компоновальної схеми (рис. 1) за допомогою елементу *Pallet Rack*;
- завдання логіки роботи моделі за допомогою послідовності блоків, що входять до складу бібліотеки моделювання процесів (*Process Modeling Library*), та їх налаштування.

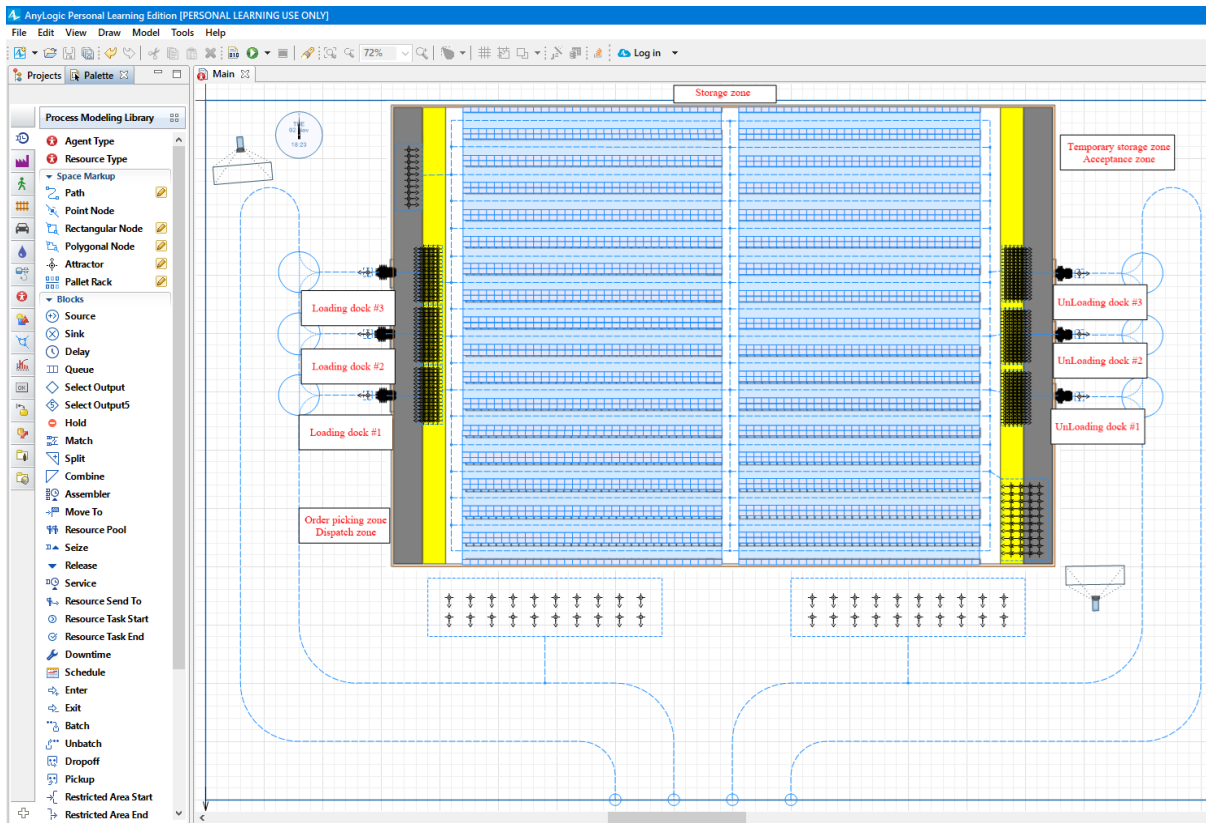


Рисунок 4 – Транспортна мережа для руху автомобілів, навантажувачів та розміщення стелажів

Аналіз структури технологічних процесів, які відбуваються на складах в результаті обробки зовнішніх та внутрішніх вантажопотоків дозволяє зробити висновок, що процес, який моделюється, можна представити у вигляді стохастичної багатофазної багатоканальної системи масового обслуговування замкнутого типу з обмеженою входною ємністю. 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. Розроблена імітаційна модель складу з фронтальними стелажми складається з 114 блоків представлена на рис. 5. Основними блоками, що були використані є:

- *Source* – генерує агентів, цей блок зазвичай є початковою точкою блок-схеми процесу;
- *Move To* – переміщує агента на нове місце;
- *Queue* – черга (буфер) агентів, які очікують на прийняття наступним блоком у блок-схемі;
- *Delay* – затримує агентів на певний час.

У назвах блоків були використані скорочення «U» «L», які відповідають процесам, що пов'язані із процесами *Unloading* та *Loading*. Таких підхід надає наочної можливості представити структуру технологічного процесу, який моделюється. Модуль №1 описує процес розвантаження автомобілів; модуль №2 – їх завантаження; модуль №3 – розвантаження палет та їх переміщення у зону зберігання; модуль №4 – переміщення палет з зони зберігання у зону навантаження; модуль №5 відповідає за створення палет, які формують страховий запас; а модуль №6 формує основні ресурси складу – навантажувачі та зону зберігання.



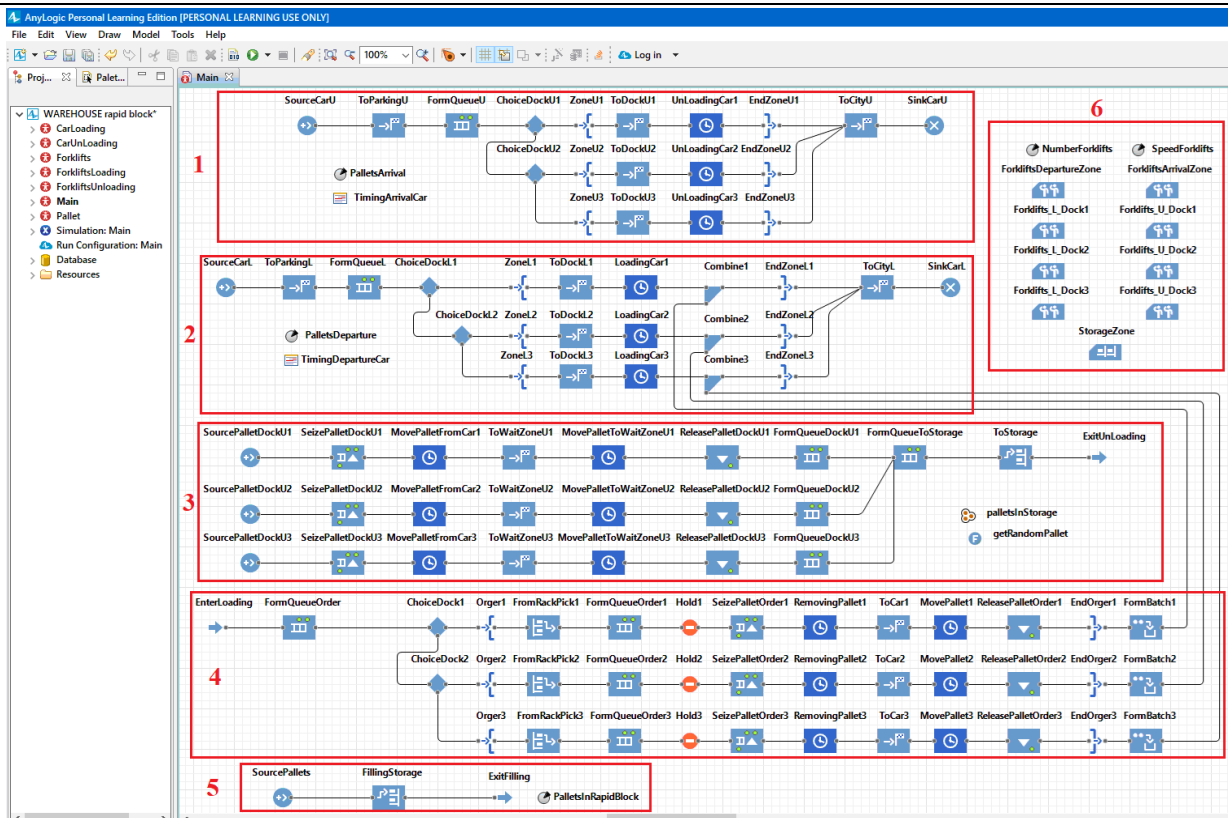


Рисунок 5 – Завдання логіки роботи складу з фронтальними стелажми у середовище AnyLogic

В розробленій моделі у якості агентів виступають наступні об’єкти (рис. 5): *CarLoading* – автомобілі, що прибувають під навантаження; *CarUnLoading* – автомобілі, що прибувають під розвантаження; *Forklifts* – навантажувачі, які обслуговують зону зберігання; *ForkliftsLoading* – навантажувачі, які обслуговують зону навантаження; *ForkliftsUnloading* – навантажувачі, які обслуговують зону розвантаження; *Pallet* – палети із вантажем.

Розроблена імітаційна модель дозволяє виявляти та встановити кореляційні відношення та взаємини між вхідними і вихідними параметрами складу, а також його ресурсами, наприклад, між кількістю навантажувачів (або доків) та тривалістю розвантаження (навантаження) транспортних засобів, часом їх очікування, коефіцієнтами використання навантажувачів, тощо. З огляду на це розроблена імітаційна модель роботи складу з фронтальними стелажми (рис. 5) може бути, представлена у вигляді наступної моделі чорної скрині (рис. 6).

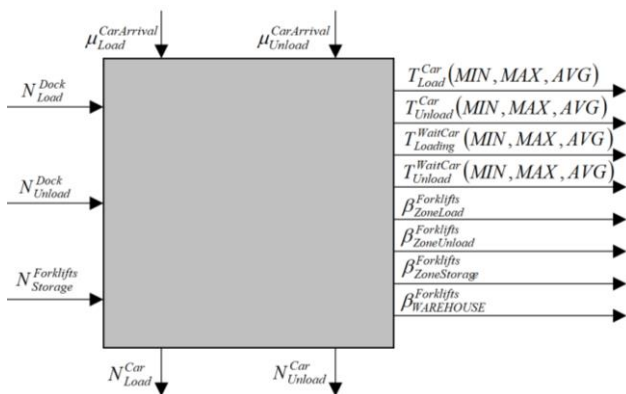


Рисунок 6 – Модель чорної скрині функціонування складського комплексу

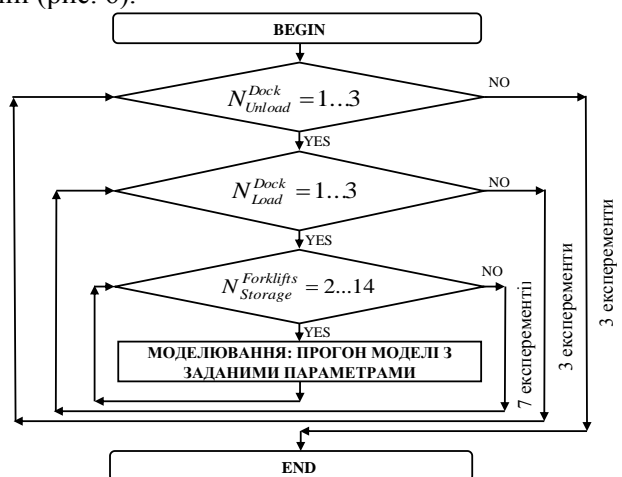


Рисунок 7 – Алгоритм постановки імітаційного експерименту

Умовні позначення, які наведені на рис. 6:  $N^{Dock Load}$  – кількість доків навантаження на складі, од.;  $N^{Dock Unload}$  – кількість доків розвантаження на складі, од.;  $N^{Forklifts Storage}$  – кількість навантажувачів у зоні

зберігання, од.;  $\mu_{Load}^{CarArrival}$  – добова інтенсивність прибуття автомобілів під навантаження, од.;  $\mu_{Unload}^{CarArrival}$  – добова інтенсивність прибуття автомобілів під розвантаження, од.;  $N_{Load}^{Car}$  – кількість завантажених автомобілів протягом доби, од.;  $N_{Unload}^{Car}$  – кількість розвантажених автомобілів протягом доби, од.;  $T_{Load}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$  – тривалість завантаження автомобілів (мінімальне, максимальне та середнє значення), хв.;  $T_{Unload}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$  – тривалість розвантаження автомобілів (мінімальне, максимальне та середнє значення), хв.;  $T_{Load}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$  – тривалість очікування завантаження автомобілів (мінімальне, максимальне та середнє значення), хв.;  $T_{Unload}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$  – тривалість очікування розвантаження автомобілів (мінімальне, максимальне та середнє значення), хв.;  $\beta_{ZoneLoad}^{Forklifts}$ ,  $\beta_{ZoneUnload}^{Forklifts}$ ,  $\beta_{ZoneStorage}^{Forklifts}$ ,  $\beta_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$  – коефіцієнти використання навантажувачів відповідно у зонах завантаження, розвантаження, зберігання та в середньому по складу.

Аналіз моделі чорної скрині дозволяє зробити наступні висновки:

- $\mu_{Load}^{CarArrival}$  та  $\mu_{Unload}^{CarArrival}$  є вхідними параметрами моделі;
- $N_{Load}^{Car}$  та  $N_{Unload}^{Car}$  є вихідними параметрами моделі;
- $N_{Load}^{Dock}$ ,  $N_{Unload}^{Dock}$  та  $N_{Storage}^{Forklifts}$  є – параметрами, що варіюються;
- $T_{Load}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$ ,  $T_{Unload}^{Car}(MIN, MAX, AVG)$ ,  $T_{Loading}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$ ,

$T_{Unload}^{WaitCar}(MIN, MAX, AVG)$ ,  $\beta_{ZoneLoad}^{Forklifts}$ ,  $\beta_{ZoneUnload}^{Forklifts}$ ,  $\beta_{ZoneStorage}^{Forklifts}$  та  $\beta_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$  є параметрами, які дозволяють оцінити ефективність системи.

Враховуючи особливості реалізації логіки моделі у *AnyLogic*, під час підготовки до імітаційного експерименту були зроблені (а потім і програмно реалізовані у моделі) наступні припущення: кількість навантажувачів зони розвантаження (навантаження) залежить від кількості доків даної зони (за кожним доком закріплюється 1 навантажувач); при зменшенні кількості доків навантажувачі, які закріплені за доком видаляються з системи; кількість навантажувачів у зоні зберігання розподіляється на дві групи, які закріплюються за зонами розвантаження та навантаження відповідно; кількість навантажувачів у зоні зберігання змінюється парно; інтенсивність прибуття автомобілів під навантаження та розвантаження складає 6 та 3 авто/год. відповідно.

Числові параметри розробленого імітаційного експерименту наведено у табл. 2, а алгоритм його реалізації на рис. 7. Враховуючи структуру запропонованого алгоритму, який складається із потрійного вкладеного циклу (рис. 7) та числових параметрів імітаційного експерименту (табл. 2) кількість прорахунків моделі становила 63 варіанти. Основні результати моделювання представлені на рис. 8-9.

Таблиця 2 – Числові параметри імітаційного експерименту

ВХІДНІ ПАРАМЕТРАМИ МОДЕЛІ			
Показник	Позначення	Значення	
Добова інтенсивність прибуття автомобілів під розвантаження	$\mu_{Unload}^{CarArrival}$	24	
Добова інтенсивність прибуття автомобілів під навантаження	$\mu_{Load}^{CarArrival}$	48	
ПАРАМЕТРАМИ, ЩО ВАРІЮЮТЬСЯ			
Показник	Позначення	Значення	
		MIN	MAX
Кількість доків розвантаження	$N_{Unload}^{Dock}$	1	3
Кількість доків навантаження	$N_{Load}^{Dock}$	1	3
Кількість навантажувачів у зоні зберігання (дві групи)	$N_{Storage}^{Forklifts}$	2(1+1)	14(7+7)

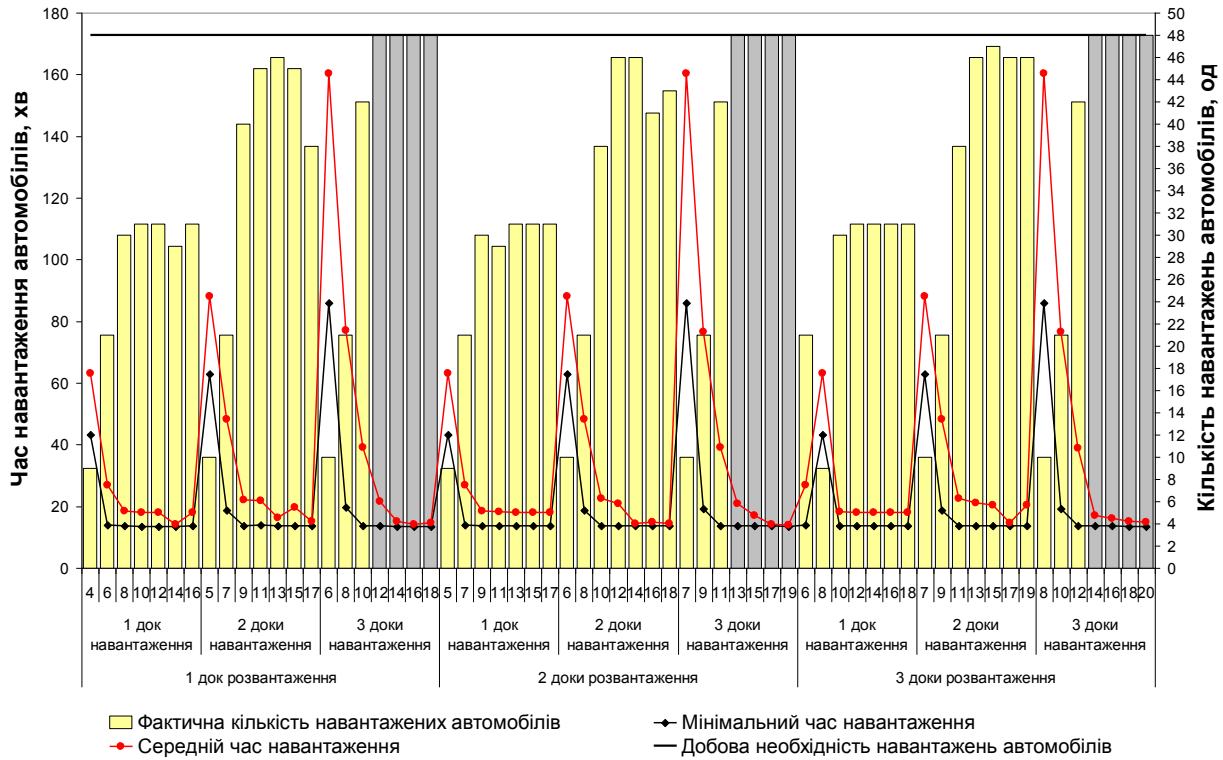


Рисунок 8 – Сумісний аналіз розподілу кількості завантажених автомобілів та тривалості завантаження

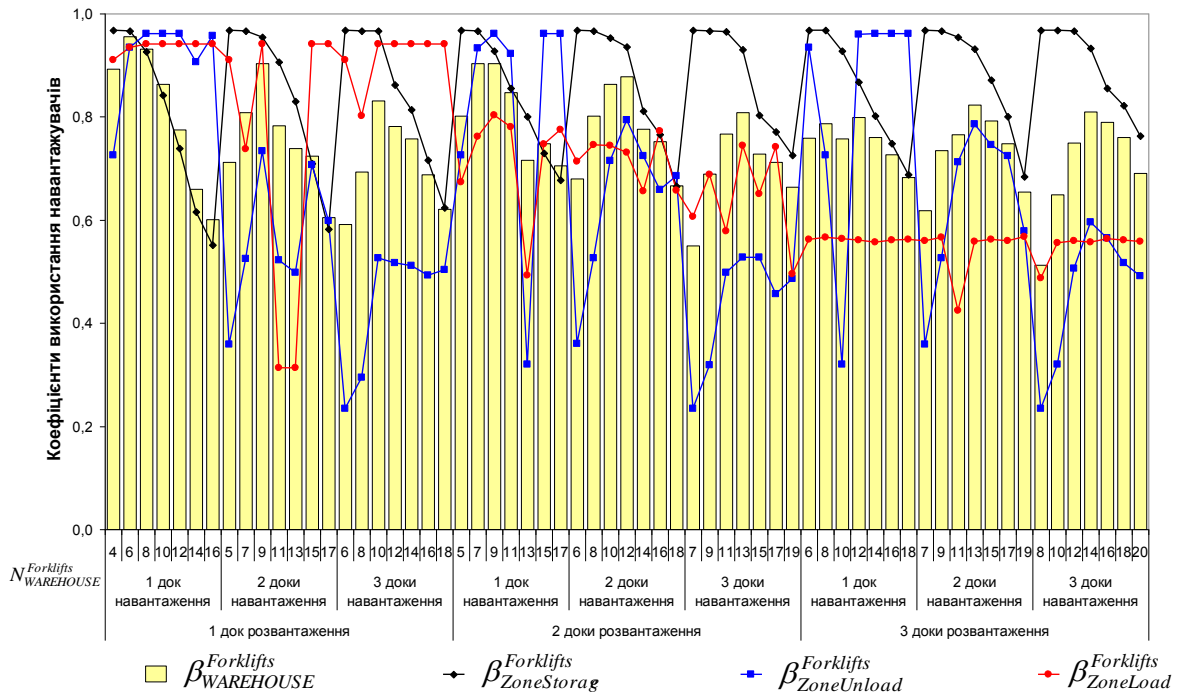


Рисунок 9 – Аналіз розподілу коефіцієнтів використання навантажувачів у відповідних зонах

Також на рис. 8-9 наведені результати розрахунків загальної кількості навантажувачів, які експлуатуються на складі протягом відповідного прорахунку моделі:

$$N_{\text{WAREHOUSE}}^{\text{Forklifts}} = N_{\text{Storage}}^{\text{Forklifts}} + N_{\text{Unload}}^{\text{Dock}} + N_{\text{Load}}^{\text{Dock}} \quad (1)$$

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволяє зробити наступні висновки:

- опанувати добовий вантажопотік по прибуттю дозволили 19 варіантів прорахунків;
- опанувати добовий вантажопотік по відправленню дозволили 12 варіантів прорахунків;



• об'єднання цих отриманих варіантів свідчить що існує лише 4 варіанти стану системи, що досліджувалася, які забезпечують функціонування складського комплексу відповідно до вхідних параметрів  $\mu_{Unload}^{CarArrival} = 24$  автомобілів та  $\mu_{Load}^{CarArrival} = 48$  автомобілів; це прогони моделі №60-63.

Для вибору оптимального варіанту експлуатації складського комплексу були обрані наступні показники роботи системи: загальна кількість навантажувачів, які експлуатуються на складі  $N_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$ ; коефіцієнт використання навантажувачів в середньому по складу  $\beta_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$ ; середня тривалість завантаження та розвантаження автомобілів  $T_{Load}^{Car}(AVG)$ ,  $T_{Unload}^{Car}(AVG)$ ; середня тривалість очікування автомобілів під завантаженням та розвантаженням  $T_{Load}^{WaitCar}(AVG)$ ,  $T_{Unload}^{WaitCar}(AVG)$ . Числові значення показників, які були обрані для визначення оптимального варіанту складського комплексу наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Числові значення показників, які були обрані для визначення оптимального варіанту функціонування складського комплексу

Показник	Значення показника				$\omega^j$	Найкращий показник	
	60	61	62	63		Напрямок	Значення
Номер прогону	60	61	62	63			
Шифр прогону	3DU3DL14 F	3DU3DL16 F	3DU3DL18 F	3DU3DL20 F			
$N_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$	14	16	18	20	0,3 0	MIN	14
$\beta_{WAREHOUSE}^{Forklifts}$	0,81	0,79	0,76	0,69	0,3 0	MAX	0,81
$T_{Load}^{Car}(AVG)$	17,14	16,03	15,14	14,82	0,1 5	MIN	14,82
$T_{Unload}^{Car}(AVG)$	36,18	34,87	34,86	34,08	0,1 5	MIN	34,08
$T_{Load}^{WaitCar}(AVG)$	11,24	10,67	9,08	8,80	0,0 5	MIN	8,80
$T_{Unload}^{WaitCar}(AVG)$	15,49	14,38	12,78	12,06	0,0 5	MIN	12,06

Кодування шифру прорахунку: «3DU3DL14F»: на складі функціонують 3 доки розвантаження, 3 доки навантаження та експлуатуються 14 навантажувачів. Для оцінки ефективності варіантів функціонування складу автори пропонують структуру комплексного показника у вигляді функціоналу наступного виду:

$$K_i = \sum_{j=1}^n \omega^j \cdot k_i^j \rightarrow \max, \quad (2)$$

де  $k_i^j$  – відносна величина  $j$ -го показника на  $i$ -му прогоні;

$n$  – кількість показників, що враховуються;

$\omega^j$  – питома вага  $j$ -го показника.

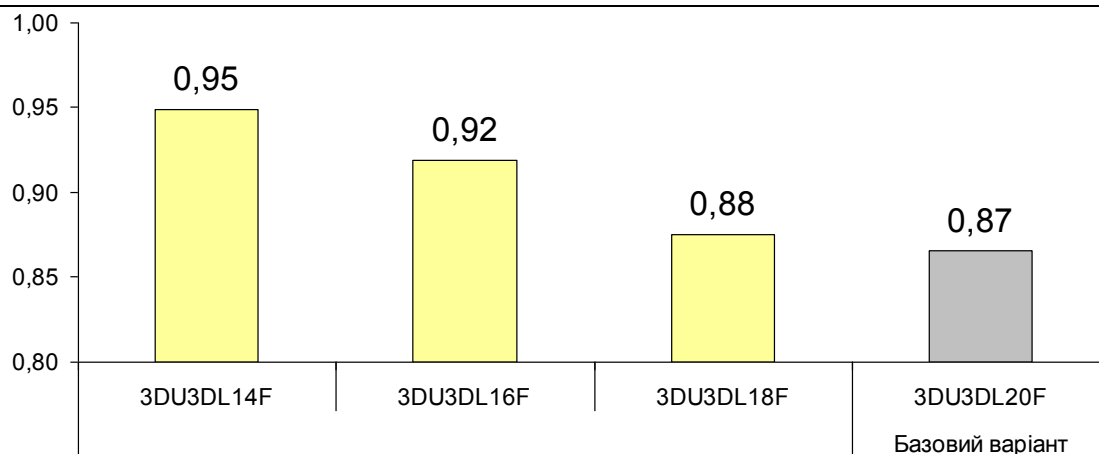
Відносні величини  $k_i^j$  будуть відображати ступінь погіршення значення кожного показника, який розглядається у порівнянні з найкращим значенням у групі, що досліджується:

$$k_i^j = \begin{cases} \frac{X_i^{j(best)}}{X_i^j}, & \text{якщо } X_i^{j(best)} = \min(X_i^j) \\ \frac{X_i^j}{X_i^{j(best)}}, & \text{якщо } X_i^{j(best)} = \max(X_i^j) \end{cases}, \quad (3)$$

де  $X_i^j$  – абсолютне значення  $j$ -го показника для  $i$ -го прогону (табл. 3);

$X_i^{j(best)}$  – найкраще значення  $j$ -го показника для  $i$ -го прогону (табл. 3);

Також у табл. 3 також наведені результати опитування, щодо визначення питомої ваги  $j$ -го показника  $\omega^j$ . Опитування було проведено серед провідних фахівців м. Дніпро, що спеціалізуються на питаннях складської логістики. На підставі виконаних розрахунків за (2) були визначені значення комплексного показника  $K_i$ , які представлені на рис. 10.

Рисунок 10 – Результати розрахунків значення комплексного показника  $K_i$ 

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз рис. 10 дозволяє зробити висновок, що експлуатація складу у варіанті «3DU3DL14F» дозволить вивільнити з роботи 6 навантажувачів, підвищити ефективність його роботи на 8% за запропонованим комплексним критерієм, забезпечуючи при цьому опанування добових вантажопотоків без критичного підвищення витрат часу на навантаження, розвантаження та очікування транспортних засобів.

### ВИСНОВКИ

Авторами був розроблений узагальнений алгоритм для створення імітаційних моделей складських комплексів у середовищі AnyLogic, який складається із створення транспортної мережі для руху автомобілів, навантажувачів та розміщення стелажів у зонах складу за допомогою елементів розмітки простору; та завдання логіки роботи складу за допомогою послідовності 114 блоків, що входять до складу бібліотеки моделювання процесів. Була виконана постановка імітаційного експерименту, який складається з 63 прорахунків моделі. У якості параметрів, що варіюються було обрано  $N_{Load}^{Dock}$ ,  $N_{Unload}^{Dock}$  та  $N_{Storage}^{Forklifts}$ . Наведені результати виконаного моделювання за результатами якого були встановлені 4 варіанти функціонування складу, які забезпечують розвантаження та завантаження необхідної кількості автомобілів протягом доби. Оптимальний варіант функціонування складського комплексу обрано на підставі запропонованого комплексного критерію.

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Крикавський Є. Логістика та управління ланцюгами поставок / Є. Крикавський, О. Похильченко, М. Фертч – Львів: Вид-во Львів. політехніка, 2017.– 801 с.
2. Тридід О. М. Логістика: навч. посібник / О.М. Тридід [та ін.] – К.: Знання, 2008.– 566 с.
3. Silva, A. & Roodbergen, K.J. & Coelho, L. C. & Darvish, Maryam. Estimating optimal ABC zone sizes in manual warehouses. *International Journal of Production Economics*. 2022. Vol. 252. 108579.
4. Celik, M. & Archetti, C & Süral, H. Inventory routing in a warehouse: The storage replenishment routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 301(3). P.1117-1132. DOI 10.1016/j.ejor.2021.11.056.
5. Oliveira, R.L.M.De. & Dabanc, L. & Schorung, M. Changes in warehouse spatial patterns and rental prices: Are they related? Exploring the case of US metropolitan areas. *Journal of Transport Geography*. 2022. Vol. 104. 103450. DOI 10.1016/j.jtrangeo.2022.103450.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Nugymanova, G. & Nurgaliyeva, M. & Zhanbirov, Zh. & Naumov, V., & Taran, I. Choosing a servicing company's strategy while interacting with freight owners at the road transport market. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 1. P. 204-210. DOI 10.33271/nvngu/2021-1/204.

10. Ramazan, B. & Mussaliyeva, R. & Bitileuova, Z. & Naumov, V. & Taran, I. Choosing the logistics chain structure for deliveries of bulk loads: Case study of the Republic Kazakhstan. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 3. P. 142–147. DOI 10.33271/nvngu/2021-3/142.
11. Fabry, Q. & Agnetis, A. & Berghman, L & Briand, C. Complexity of flow time minimization in a crossdock truck scheduling problem with asymmetric handover relations. *Operations Research Letters*. 2022. Vol. 50 (1). P. 50-56. DOI 10.1016/j.orl.2021.12.004.
12. 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.
13. Onal, S & Zhu, W. & Das, S.K. Order picking heuristics for online order fulfillment warehouses with explosive storage. *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 256. 108747.
14. 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.
15. Bolu, A. & Korcak, O. Path Planning for Multiple Mobile Robots in Smart Warehouse. *IEEE 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, ICCMA*. 2019. 8988635. P. 144-150.
16. Ferrara, A. & Gebennini, E. & Grassi, A. Fleet sizing of laser guided vehicles and pallet shuttles in automated warehouses. *International Journal of Production Economics*. 2014. Vol. 157. P. 7-14.
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. Zhang, Y. & Wang, Y. & Wu, L. Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: A Simulation Based on AnyLogic in System Engineering. *Systems Engineering Procedia*. 2012. Vol. 3. P. 249-258. DOI 10.1016/j.sepro.2011.11.027.

## REFERENCES

1. Krykavskiy Ye. & Pokhylchenko O. & Fertch M. (2017). Lohistyka ta upravlinnia lantsiuhamy postavok. Lviv: Vyd-vo Lviv. Politekhnik, 801. [in Ukrainian].
2. Trydid O. M. ta in. (2008). Lohistyka: navch. Posibnyk. K.: Znannia, 566. [in Ukrainian].
3. Silva, A. & Roodbergen, K.J. & Coelho, L. C. & Darvish, Maryam. (2022). Estimating optimal ABC zone sizes in manual warehouses. *International Journal of Production Economics*, 252, 108579.
4. Celik, M. & Archetti, C & Süral, H. (2022). Inventory routing in a warehouse: The storage replenishment routing problem. *European Journal of Operational Research*, 301(3), 1117-1132. DOI 10.1016/j.ejor.2021.11.056.
5. Oliveira, R.L.M.De. & Dablanc, L. & Schorung, M. (2022). Changes in warehouse spatial patterns and rental prices: Are they related? Exploring the case of US metropolitan areas. *Journal of Transport Geography*, 104, 103450. DOI 10.1016/j.jtrangeo.2022.103450.
6. 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.
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. 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.
9. Nugymanova, G. & Nurgaliyeva, M. & Zhanbirov, Zh. & Naumov, V., & Taran, I. (2021). Choosing a servicing company's strategy while interacting with freight owners at the road transport market. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1. 204-210. DOI 10.33271/nvngu/2021-1/204.
10. Ramazan, B. & Mussaliyeva, R. & Bitileuova, Z. & Naumov, V. & Taran, I. (2021). Choosing the logistics chain structure for deliveries of bulk loads: Case study of the Republic Kazakhstan. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 142–147. DOI 10.33271/nvngu/2021-3/142.
11. Fabry, Q. & Agnetis, A. & Berghman, L & Briand, C. (2022). Complexity of flow time minimization in a crossdock truck scheduling problem with asymmetric handover relations. *Operations Research Letters*, 50 (1), 50-56. DOI 10.1016/j.orl.2021.12.004.
12. 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.
13. Onal, S & Zhu, W. & Das, S.K. (2023). Order picking heuristics for online order fulfillment warehouses with explosive storage. *International Journal of Production Economics*, 256, 108747..
14. 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.
15. Bolu, A. & Korcak, O. (2019). Path Planning for Multiple Mobile Robots in Smart Warehouse. *IEEE 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, ICCMA*, 8988635, 144-150.

16. Ferrara, A. & Gebennini, E. & Grassi, A. (2014). Fleet sizing of laser guided vehicles and pallet shuttles in automated warehouses. *International Journal of Production Economics*, 157, 7-14.
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. Zhang, Y. & Wang, Y. & Wu, L. Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: A Simulation Based on AnyLogic in System Engineering. *Systems Engineering Procedia*. 2012. Vol. 3. P. 249-258. DOI 10.1016/j.sepro.2011.11.027.

**I. Taran, V. Litvin, I. Klymenko. Optimization of the functioning of a warehouse complex with front shelves in the anylogic environment.**

The paper is devoted to the solution of the actual scientific task of increasing the efficiency of the warehouse complexes functioning by means of simulation modeling. On the basis of the analysis of recent studies, it was established that the main criterion for the effective operation of any warehouse is providing necessary cargo circulation with optimal costs for processing and storing goods. It has been proven that warehouses belong to complex systems, in which the possibility of applying traditional methods of finding optimal solutions is limited, therefore, modern research methods must be used to justify management decisions during the development or modernization of warehouse operations. One of these methods is simulation modeling.

A modern warehouse complex located in the city of Dnipro was chosen as the object of the study. To analyze the possibilities of increasing the reliability of its operation and reducing capital and current costs during operation, a simulation model was developed in the AnyLogic environment (developer The AnyLogic Company). The developed model consists of two elements. 1. The transport network for the movement of cars, forklifts and racks placement in warehouse areas in accordance with its layout scheme. 2. Process diagram, which represents a sequence of 114 blocks of the AnyLogic process modeling library, which cause the logic of warehouse operation. 2. Process diagram, which represents a sequence of 114 blocks of the AnyLogic process modeling library, which cause the logic of warehouse operation.

The presentation of the developed simulation model in the form of a black box allows studying the influence of the input and output parameters of the warehouse on the efficiency of using its resources. A simulation experiment algorithm was proposed, it consists of a triple nested cycle of varying the main warehouse parameters: the number of loading and unloading docks, as well as the number of forklifts in the storage area. The total number of model calculations was 63 variants. According to the results of the performed simulation, 4 variants of the warehouse operation were established, which ensure the fulfillment of its daily cargo turnover. For the final assessment of the obtained results, the structure of a complex criterion was proposed, which takes into account the total number of forklifts operated in the warehouse; the average utilization rate of forklifts; the average duration of loading and unloading cars; the average waiting time for cars being loaded and unloaded.

**Keywords:** warehouse, forklift, rapid block, dock, AnyLogic, simulation model, setting up the experiment efficiency criterion.

*ТАРАН Ігор Олександрович*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», e-mail: [taran7077@gmail.com](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:klymenkoiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6263-0951>.

DOI 10.36910/automash.v1i20.1055