

УДК 656.212

Є. Б. ДЕМЧЕНКО^{1*}, В. В. МАЛАШКІН^{2*}, А. С. ДОРОШ^{3*}, І. Я. СКОВРОН^{4*}

^{1*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, ел. пошта: e.b.dmch@gmail.com, ORCID 0000-0003-1411-6744

^{2*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793-19-13, ел. пошта: viacheslav.malashkin@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{3*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 927 84 62, ел. пошта dorosh.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5393-0004

^{4*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, ел. пошта: norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДСЬКИХ КОМПЛЕКСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Мета. В сучасних умовах задача удосконалення систем зберігання матеріальних запасів має значну наукову і практичну значимість. При цьому характер і ступінь впливу параметрів вхідного потоку вантажів на потрібне технічне оснащення складів з позицій логістики та системного підходу вивчені недостатньо. Відсутність остаточного рішення задачі щодо розробки універсальної методики визначення раціональних технічних і технологічних параметрів складів тарно-штучних вантажів сформулювало мету дослідження, яка полягає у встановленні раціонального оснащення складського комплексу на основі імітаційного моделювання процесу його функціонування, що формалізований мережею Петрі. **Методика.** У роботі авторами представлена методика формалізації процесу функціонування транспортно-складського комплексу за допомогою мережі Петрі у середовищі QPNet. Представлена методика техніко-економічного порівняння варіантів оснащення складського комплексу, в основі якої лежить використання модифікованих приведених витрат. **Результати.** У роботі виконано огляд існуючих імітаційних моделей складських комплексів, визначені їх переваги та недоліки. На основі виконаного аналізу визначена імітаційна система для розробки моделі складського комплексу. У статті наведена універсальна методика визначення раціональних технічних і технологічних параметрів складів тарно-штучних вантажів з використанням імітаційної моделі складу, технологічний процес роботи якого представлено мережею Петрі. З розробленою імітаційною моделлю складу виконана серія експериментів, що відрізняються експлуатаційними умовами функціонування, в результаті чого отримана сукупність техніко-експлуатаційних показників роботи складського комплексу. Отримані показники функціонування складу стали основою для визначення його раціонального технічного оснащення. **Практична значимість** представленої у роботі методики побудови універсальної моделі складського комплексу і техніко-економічної оцінки показників його функціонування дозволить більш точно визначати раціональну кількість технічних засобів і технічне оснащення при проектуванні нових або реконструкції існуючих транспортно-складських комплексів.

Ключові слова: складський комплекс; імітаційне моделювання; мережа Петрі; оснащення складського комплексу; QPNet

Вступ

Сучасний склад представляє собою складну систему, що складається з багатьох елементів, яка має певну структуру і виконує різні операції з переробки, зберігання і розподілу матеріального потоку. У свою чергу, склад є інтегрованою складовою частиною системи більш високого рівня – логістичного ланцюга. Основна роль складської системи полягає в плануванні та оптимізації матеріального потоку, що проходить через неї.

Сучасним інструментом дослідження матеріального потоку складських систем є метод імітаційного моделювання, який дозволяє знаходити раціональні параметри роботи як існуючого, так і спроектованого складу. Основною перевагою даного методу є можливість виконувати серії експериментів з модельованою системою, не порушуючи і не перериваючи поточні технологічні операції на існуючому складі, а також перевіряти різні сценарії роботи спроектованого складу до початку його експлуатації.

Об'єднання імітаційного моделювання з методами оптимізації є інструмент, за допомогою якого можна планувати і приймати управлінські рішення на складі, ефективно підтримуючи роботу менеджерів.

Питання пошуку ефективного технічного оснащення і технології роботи транспортно-складських комплексів на даний час є актуальним, якому присвячено значна кількість наукових робіт. Так, в роботі [1] представлена модель технології роботи універсального транспортно-складського комплексу по переробці упакованих вантажів. Модель представлена в мережах Петрі. Використання запропонованої моделі, дозволяє для універсальних транспортно-складських комплексів визначати раціональні технологічні процеси. Моделювання роботи необхідно для визначення потрібної кількості робочих зон, технічних засобів та іншого технічного оснащення. Це потрібно для проектування нових універсальних транспортно-складських комплексів або реконструкції існуючих.

У роботі [2] досліджується продуктивність найбільшого складу відділу логістики міністерства оборони США (Defense Logistics Agency, DLA), розташованого в Нью-Камберленде. DLA – найбільша служба підтримки логістики міністерства оборони США, що надає глобальну підтримку логістики сімнадцяти центрам розподілу в Америці і дев'яти інших країнах. DLA отримує щодня сотні тисяч продуктів від різних виробників і спрямовує їх до військових баз. Основною метою моделювання такої системи є визначення оптимальної кількості трудових ресурсів в кожному цеху складу. Кінцевим підсумком реалізації моделі є удосконалення існуючих бізнес-процесів на основі даних, отриманих в результаті виконаних експериментів з моделлю. Імітаційна модель, що описує роботу DLA, є дискретно-подієвою, розроблена за допомогою системи імітаційного моделювання Arena.

Автори статті [3] представили модель роботи складу косметичної і фармацевтичної продукції, за допомогою якої вирішується проблема розміщення товарних одиниць на складі (поділ на слоти) і вибір оптимального маршруту руху при складуванні замовлення для виробництва і подальшого відвантаження продукції. Представлена розробка складської системи управління, що складається з оптимізаційної і імітаційної моделей, інтегрованих з технологією RFID. Імітаційна модель розроблена за допомогою пакета Arena і об'єднана з базою даних Microsoft Access, оптимізаційна модель розроблена в Visual Basic на основі генетичного алгоритму.

Робота [4] присвячена моделюванню процесів на складі виробів харчової промисловості, включаючи процес приймання товару, розміщення, зберігання, відбору і доставки товару споживачеві. Представлена дискретно-подієва імітаційна модель розроблена в системі ExtendSim, а оптимізаційна модель – в пакеті OptQuest. За допомогою даних моделей вирішується питання раціонального використання ресурсів на складі (обладнання і персонал) і тривалості виконання технологічних операцій, аналізуються середня довжина черги, час знаходження в черзі і коефіцієнт завантаження обладнання в пунктах приймання товару і відвантаження.

У статті [5] представлена модель процесів відбору на складі необхідного товару і його відправлення постачальникам. Представлена дискретно-подієва модель розроблена в Enterprise Dynamics 5.1. Багатокритеріальна задача оптимізації полягає в максимізації використання наявних ресурсів на складі, мінімізації вартості трудових ресурсів і мінімізації витрат, пов'язаних з запізненням замовлення або його передчасним виконанням. Модель оптимізації побудована на основі генетичного алгоритму, розробленому в програмному середовищі Delphi. Крім того, система інтегрована з базою даних і оснащена комп'ютерною анімацією. Результатом моделювання є точний план відвантаження продукції.

Мета дослідження

В сучасних умовах задача удосконалення систем зберігання матеріальних запасів має значну наукову і практичну значимість. При цьому характер і ступінь впливу параметрів вхідного потоку вантажів на потрібне технічне оснащення складів з позицій логістики та системного підходу вивчені недостатньо. Відсутність остаточного рішення задачі щодо розробки універсальної методики визначення раціональних технічних і технологічних параметрів складів тарноштучних вантажів сформулювало мету дослідження, яка полягає у встановленні раціонального оснащення складського комплексу на основі імітаційного моделювання процесу його функціонування, що формалізований мережею Петрі.

Методи дослідження

Дослідження виконано з використанням методів імітаційного моделювання роботи складського комплексу, технологічний процес якого представлений мережею Петрі.

Методика дослідження

Складський комплекс (СК) доцільно розглядати як систему масового обслуговування з випадковим вхідним потоком та випадковою тривалістю обслуговування. Кількісними показниками функціонування таких систем є:

– кількість вимог в окремий момент часу у стані очікування обслуговування (у черзі) $n_{ч}$, у стані обслуговування $n_{обс}$, загалом у системі n_c ;

– тривалість знаходження окремої вимоги у стані очікування $t_{оч}$, під обслуговуванням $t_{обс}$, загалом у системі t_c .

Розглянемо процес моделювання функціонування СК за допомогою апарату мереж Петрі на прикладі зони прийомки вантажів (ЗП). Укрупнена імітаційна модель даної ділянки СК зображена на рис. 1 у вигляді часової мережі Петрі.

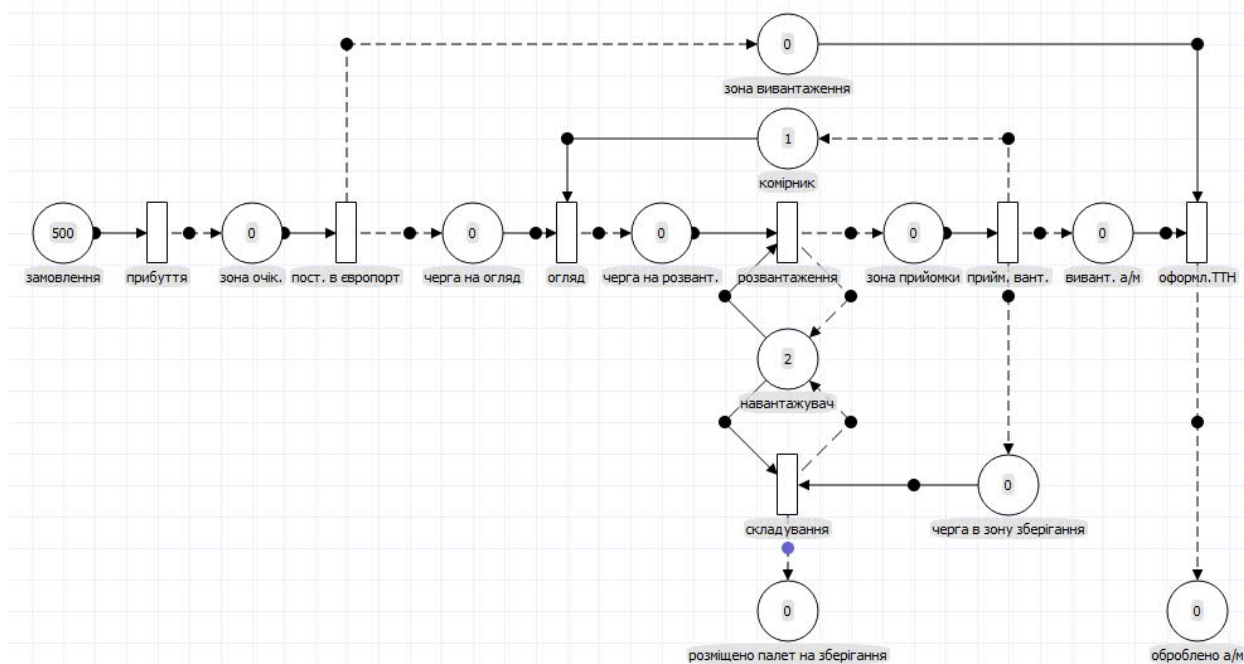


Рис. 1. Модель процесу функціонування зони прийомки СК у вигляді мережі Петрі

Вказана модель складається з наступних елементів.

1) Позиції, за допомогою яких ведеться облік кількості:

- замовлення – автомашин (АМ), що прямують на СК;
- зона вивантаження – АМ під вивантаженням;
- зона очік. – АМ в черзі на постановку в зону вивантаження;
- черга на огляд – АМ, що очікують огляд перед вивантаженням;
- черга на розвант. – черга АМ на розвантаження;
- зона прийомки – черга на прийом вантажу;
- вивант. а/м – черга на оформлення товарно-транспортної накладної (ТТН) після вивантаження;
- оброблено а/м – вивантажено АМ за період моделювання;
- черга в зону зберігання – черга на переміщення в зону зберігання;

– розміщено палет на зберігання – оброблено вантажних місць за період моделювання.

Крім того позиції використовуються для контролю кількості та зайнятості виконавців:

- комірник – комірників ЗП;
 - навантажувач – електронавантажувачів ЗП.
- 2) За допомогою переходів виконується моделювання технологічних операцій СК:
- прибуття – прийом АМ на СК з інтервалом I ;
 - пост. в європорт – постановка АМ на пост розвантаження $t_{пост}$;
 - огляд – огляд зовнішнього стану кузова АМ та пломб $t_{огл}$;
 - розвантаження – розвантаження вантажу із АМ в зону прийомки t_p ;
 - прийм. вант – прийомка вантажу за кількістю та якістю в ЗП складу $t_{пр}$;
 - складування – переміщення вантажу із зони прийомки в зону зберігання складу t_c ;

– оформлення ТТН – оформлення ТТН після розвантаження АМ $t_{\text{ТТН}}$.

В результаті моделювання можливо визначити середню кількість АМ в очікуванні вивантаження, середню тривалість знаходження АМ в зоні вивантаження та потрібну кількість постів вивантаження Z складу. При цьому розглядаються варіанти роботи СК з кількістю комірників $K_{\text{ком}} = 1..3$ та двома електронавантажувачами $K_{\text{н}} = 2$.

Для дослідження параметрів СК за допомогою розробленої моделі може бути використаний емулятор QPNet [6], який дозволяє будувати мережі Петрі та змінювати їх параметри в інтерактивному режимі, імітувати функціонування дискретних систем, накопичувати та зберігати результати моделювання у файлі сумісному з MS Excel. Прийоми використання вказаного емулятора для дискретно-подієвого моделювання транспортного об'єкта представлені в [7].

Розглянемо алгоритм функціонування розробленої моделі зони прийомки СК. Позиція «замовлення» є джерелом надходження вимог у систему; при цьому моделювання відбувається до моменту досягнення заданої кількості АМ, які повинні бути обслуговані системою, що відповідає кількості міток в даній позиції.

Позиція «замовлення» сполучається з переходом «прибуття» дугою з кратністю 1, тому даний перехід спрацьовує у разі наявності у попередній йому позиції хоча б одної мітки. Система QPNet дозволяє реалізувати часову затримку спрацювання переходу; при цьому можливо задати як детерміновану, так і випадкову тривалість затримки, розподілену за нормальним, експоненціальним або рівномірним законами.

Таким чином, на черговому кроці моделювання при наявності міток в позиції «замовлення» спрацьовує перехід «прибуття», який забирає з вказаної позиції одну мітку. Дана мітка затримується в цьому переході на задану кількість кроків; при цьому перехід припиняє відбір нових міток на час затримки в ньому чергової мітки. Після вичерпання тривалості затримки перехід віддає мітку в позицію «зона очік». В роботі спрощено приймається, що довжина черги АМ до СК є необмеженою.

Далі імітується процес постановки АМ на пост вивантаження, для чого задається відповідна затримка спрацювання переходу «пост. в європорт». Після вичерпання затримки даний перехід віддає мітки в кожен вихідну дугу у кількості, що відповідає кратності вказаної дуги. Так, перехід «пост. в європорт» сполучається з

позиціями «зона завантаження» та «черга на огляд» дугами з кратністю 1, тому після спрацювання даного переходу у вказані позиції буде додано по одній мітці. Ці позиції реалізують функцію лічильника кількості зайнятих постів вивантаження та числа АМ, що очікують огляд.

Перехід «огляд» імітує процес візуального огляду комірником кузову АМ та пломб. Даний перехід має 2 вхідні позиції: «черга на огляд» та «комірник», які сполучаються з цим переходом дугами з кратністю 1. Тому перехід «огляд» спрацює тільки у тому випадку, коли в обох вхідних позиціях буде мінімум по одній мітці – огляд розпочнеться тільки тоді, коли в черзі на обслуговування є хоча б одна АМ та наявний вільний комірник. При виконанні даної умови перехід «огляд» забирає з його вхідних позицій по одній мітці та затримує їх проходження аналогічно переходу «прибуття». Після спрацювання переходу «огляд» віддає мітку в позицію «черга на розвант.», яка є лічильником кількості готових до розвантаження АМ.

Перехід «розвантаження» імітує процес розвантаження кузову АМ за допомогою електронавантажувача та має 2 вхідні позиції: «черга на розвант.», «навантажувач», які сполучаються з даним переходом дугами з кратністю 1. Відповідно, даний перехід спрацює лише у випадку наявності мінімум по 1 мітці у кожній вхідній позиції – розвантаження почнеться у разі наявності готової АМ та вільного електронавантажувача.

Після вичерпання затримки спрацювання переходу «розвантаження» ним віддаються мітки в позицію «зона прийомки», яка обліковує кількість вивантажених партій вантажу, та в позицію «навантажувач» - що обліковує кількість вільних електронавантажувачів.

Після цього мітка переміщується в перехід «прийм. вант.», який імітує процес прийомки комірником партії вантажу за кількістю та якістю. Після вичерпання затримки вказаного переходу мітки передаються в позицію «комірник» для вивільнення комірника після вивантаження та прийомки чергової АМ, та в позицію «черга в зону зберігання», яка обліковує кількість прийнятих СК на зберігання партій вантажу.

Перехід «складування» імітує процес перміщення вантажів в зону зберігання. Вказана операція виконується електронавантажувачами зони прийомки та має пріоритет перед розвантаженням автомобілів. Для реалізації вказаної черговості задіяння навантажувачів у властивостях вказаного переходу вказується відповідна пріоритетність його спрацювання. Після вичерпання

затримки вказаного переходу мітка повертається в позицію «навантажувач» та позначає звільнення електронавантажувача. Також мітки віддаються в позицію «розміщено палет на зберігання». В даному випадку відбувається перехід від обліку кількості партій до обліку кількості палет. В роботі прийнято, що партія складається з 33 європалет, що відповідає максимальному завантаженню тентованого напівпричепа. У цьому зв'язку кратність дуги, що сполучає перехід «складування» з позицією «розміщено палет на зберігання» необхідно встановити рівною 33.

На завершальному етапі моделювання обслуговування АМ мітка потрапляє в перехід «оформл. ТТН», який при спрацюванні також забирає мітку з позиції «зона вивантаження», звільняючи пост вивантаження, на якому виконувалось обслуговування АМ. Після спрацювання даного переходу мітка потрапляє в позицію «оброблено а/м», що обліковує кількість відправлених АМ з СК.

Після того, як міток в позиціях мережі стає недостатньо для спрацювання жодного переходу, моделювання припиняється.

Результати

З використанням розробленої моделі в роботі виконано дослідження впливу вхідного потоку автомашин λ на показники функціонування зони прийомки СК. При моделюванні були прийняті наступні вихідні дані:

– інтервал I прибуття АМ – випадковий, розподілений за експоненціальним законом; величина $M[I]$ варіювалась в межах від 40 до 100 хв.;

– тривалість вантажних операцій – випадкова, розподілена за нормальним законом. Величина тривалості t_p розвантаження АМ має параметри: $M[t_p] = 35$ хв.; $\sigma[t_p] = 5$ хв.; тривалості переміщення вантажів t_c в зону зберігання – $M[t_c] = 30$ хв.; $\sigma[t_c] = 3$ хв.;

– тривалість початково-завершальних операцій (постановки АМ на пост $t_{\text{пост}}$, огляду $t_{\text{огл}}$, приймання $t_{\text{пр}}$, оформлення ТТН $t_{\text{тн}}$) – випадкова, розподілена за рівномірним законом в межах: $M[t_{\text{пост}}] \in [3;7]$ хв.; $M[t_{\text{огл}}] \in [2;5]$ хв.; $M[t_{\text{пр}}] \in [8;15]$ хв.; $M[t_{\text{тн}}] \in [2;8]$ хв.

В результаті моделювання в середовищі QPNet отримано динаміку зміни кількості міток в кожній позиції у вигляді колекції кортежів {крок моделювання; нове значення кількості міток}, на основі аналізу якої було визначено середню тривалість T_n знаходження АМ на постах вивантаження. Крім того засобами QPNet отримано інтегральну функції розподілу випадкової величини кількості вимог в системі (позиція «зона вивантаження»), на основі якої було визначено потрібну кількість постів вивантаження Z , яка б дозволила приймати АМ без затримки з надійністю $\alpha = 0,95$. Результати моделювання обслуговування на СК потоку з 500 АМ представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання функціонування зони прийомки СК

$M[I]$, хв.	$K_{\text{ком}} = 1$		$K_{\text{ком}} = 2$		$K_{\text{ком}} = 3$	
	Z , постів	T_n , хв.	Z , постів	T_n , хв.	Z , постів	T_n , хв.
40	108	2938,03	15	253,49	10	129,35
50	37	1089,24	8	97,02	6	91,29
60	11	174,23	6	75,96	6	81,19
70	8	120,92	5	74,36	5	67,54
80	6	94,69	5	68,78	4	64,87
90	5	78,12	4	64,07	4	58,03
100	4	64,54	4	59,14	4	57,12

Як видно з таблиці, при значній нерівномірності прибуття АМ, якою характеризується прийнятий випадковий вхідний потік вимог, розподілений за експоненціальним законом, зі скороченням інтервалу прибуття $M[I]$ спостерігається інтенсивне зростання потрібної кількості

постів Z . Це пояснюється значним рівнем завантаження комірників та електронавантажувачів та пов'язаним з цим зростанням черги АМ (див. рис. 2).

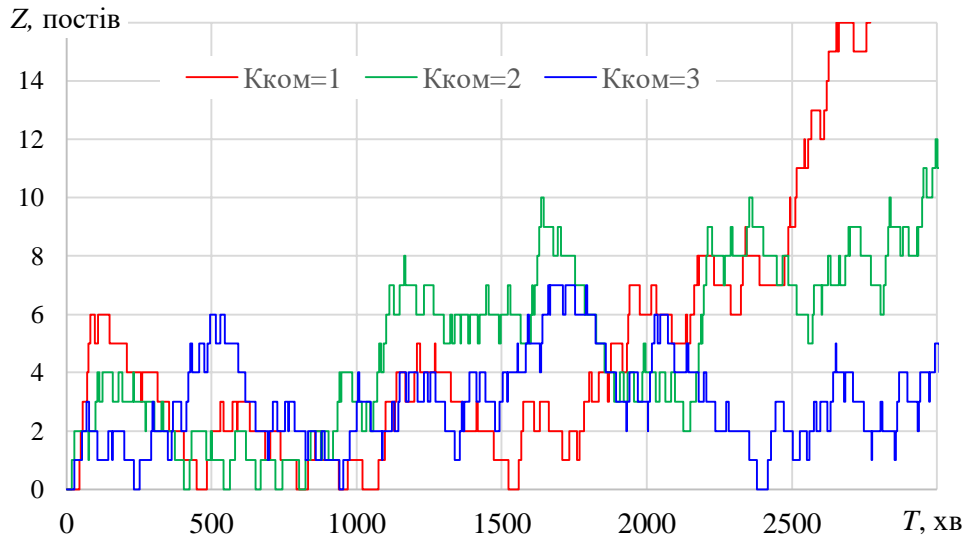


Рис. 2. Динаміка зміни кількості зайнятих постів вивантаження при $M[I] = 40$ хв

Вибір ефективного варіанта оснащення зони прийомки СК може бути здійснений за мінімальною величиною модифікованих приведених витрат (МПВ), які визначаються на основі отриманих результатів моделювання за формулою [8]:

$$\text{МПВ} = K + (E(1 - \beta) - A\beta) \frac{1 - (1 + d)^{-T}}{d}, \quad (1)$$

де K – капітальні вкладення в оснащення СК, тис. грн.;

E – щорічні експлуатаційні витрати без урахування амортизаційних відрахувань, тис. грн.;

A – амортизаційні відрахування тис. грн.;

β – норма податку на прибуток;

d – мінімальна необхідна норма доходу на капітал;

T – тривалість життєвого циклу проекту, років.

Спрощено прийемо, що з постійних пристроїв СК за варіантами буде змінюватись лише кількість постів розвантаження. Тоді капітальні вкладення можуть бути визначені як

$$K = c_{\text{п}} Z, \quad (2)$$

де $c_{\text{п}}$ – вартість облаштування одного поста розвантаження, тис. грн.

Амортизаційні відрахування визначаються прямолінійним методом за формулою

$$A = \frac{K}{T}. \quad (3)$$

Річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою

$$E = E_{\text{ком}} + E_{\text{пв}} + E_{\text{ам}}, \quad (4)$$

де $E_{\text{ком}}$ – витрати на утримання комірників;

$E_{\text{пв}}$ – витрати на утримання постів вивантаження;

$E_{\text{авт}}$ – витрати, пов'язані з тривалістю знаходження АМ у зоні вивантаження.

Складові частини формули (4) можна знайти так:

– витрати, пов'язані з утриманням комірників

$$E_{\text{ком}} = 4,5e_{\text{ком}} K_{\text{ком}}, \quad (5)$$

де $e_{\text{ком}}$ – річні витрати на утримання 1 комірника, тис. грн.;

$K_{\text{ком}}$ – кількість комірників в зміну.

– витрати на утримання постів вивантаження

$$E_{\text{пв}} = e_{\text{пв}} Z, \quad (6)$$

де $e_{\text{пв}}$ – річні витрати на утримання 1 поста вивантаження, тис. грн.;

– витрати, пов'язані з тривалістю знаходження АМ на СК

$$E_{\text{ам}} = 365 \frac{T_{\text{п}}}{60} N_{\text{ам}} e_{\text{ам}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{п}}$ – середня тривалість знаходження АМ у зоні вивантаження, хв.;

$e_{\text{ам}}$ – вартість 1 години простою АМ;

$N_{\text{ам}}$ – кількість АМ, які прибувають за добу, що визначається як

$$N_{\text{ам}} = 1440 / M[I], \quad (8)$$

де $M[I]$ – середній інтервал прибуття, хв.

Для економічного обґрунтування ефективного варіанту оснащення зони прийомки СК прийняті наступні вихідні дані: $T = 10$ років; $\beta = 0,18$; $d = 0,15$; $c_{\text{п}} = 20,0$ тис. грн.; $e_{\text{пв}} = 5,0$ тис. грн.; $e_{\text{ком}} = 90,0$ тис. грн.; $e_{\text{ам}} = 0,15$ тис. грн.

Значення величини МПВ за варіантами оснащення зони прийомки СК представлено на рис. 3.

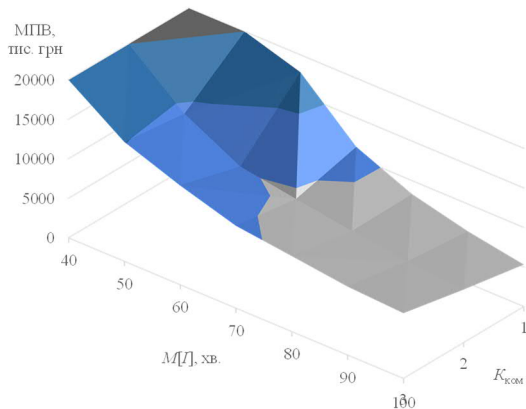


Рис. 3. Модифіковані приведені витрати за варіантами оснащення зони прийомки СК

За розрахованою величиною МПВ можливо визначити граничні значення інтенсивності вхідного потоку поїздів λ , при яких кожен з розглянутих варіантів оснащення СК є ефективним (див. рис. 4).

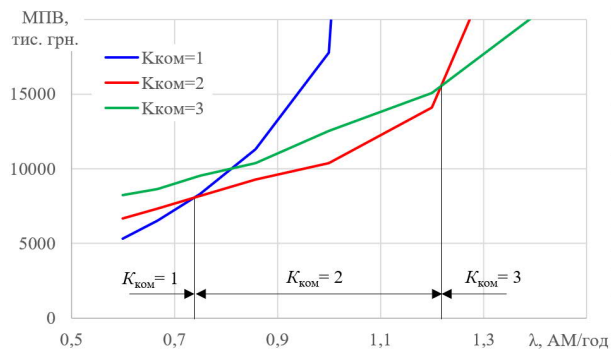


Рис. 4. Ефективність варіантів оснащення зони прийомки СК

У відповідності до графіку витрат (рис. 4) встановлено, що при інтервалі надходження автомобілів $M[L] > 82$ хв доцільно залучати до роботи одного комірника, а при інтервалі $M[L] < 49$ хв – трьох комірників.

Висновки

Виконані у роботі аналіз та дослідження дозволили сформулювати наступні висновки.

1. Для визначення достовірних показників функціонування систем зберігання матеріальних запасів доцільно використовувати методи імітаційного моделювання.

2. Серед різноманіття імітаційних систем найбільш популярними є універсальні системи, які на відміну від спеціалізованих доступні більш широкому колу дослідників, не зважаючи на вимогу певного їх доопрацювання і адаптації під конкретний процес.

3. Запропоновані деякі удосконалення до часової мережі Петрі, за допомогою якої формалізований процес функціонування складського комплексу, що дозволить більш точно врахувати вплив технічного оснащення зони прийомки на показники її функціонування.

4. Запропонована методика техніко-економічного обґрунтування варіантів оснащення складського комплексу.

5. Визначені ефективний штат комірників та кількість портів розвантаження в зоні прийомки складського комплексу у різних експлуатаційних умовах роботи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Чеклов, В. Ф. Розробка моделі технології роботи універсального транспортно-складського комплексу в мережах Петрі / В. Ф. Чеклов, Н. О. Криштафович // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – № 3 (210) – 2014. – 284-288.

2. Ekren B. Y., Evans G. W., Heragu S. S., Usher J. S. Simulation-based performance improvement of a defense logistics warehouse // International Material Handling Research Colloquium (IMHRC). – 2012. – P. 1-10.

3. Ramirez Rios D. G., Ramirez Polo L. E., Castro Bolano L. J., Jimenez Barros M. A., Manotas Romero L. P. RFID implementation and simulation-based system dynamics for optimizing warehousing strategies under multiple criteria // Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2012), Megaprojects: Building infrastructure by fostering engineering collaboration, efficient and effective integration and innovative planning. – 2012. – P. 162-171.

4. Hajnal E., Kollar G. Optimization of food logistics by simulation technique // Hungarian journal of industrial chemistry Veszprem. – Vol. 33 (1-2). – 2005. – P. 105-111.

5. Molnar B. Planning of order picking processes using simulation and a genetic algorithm in multicriteria scheduling optimization // Proceedings 16th European Simulation Symposium. – 2004. – P. 1-6.

6. Коба, В. Быстродействующий эмулятор сетей Петри QPNet / В. Коба, Н. Кочетков Н. // III Студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум 2011», 2011.

7. Демченко, Є. Б. Дослідження параметрів залізничних станцій з використанням мереж Петрі / Є. Б. Демченко, В. В. Малашкін, І. Я. Сковрон // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, №3(87), Д.: ДНУЗТ – 2020. – С. 25-36. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208551>

8. Виленский П. Л., Лившиц В. Н., Смоляк С. А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. Москва: Дело. 2004. 888 с.

Надійшла в редколегію 03.06.2021

Прийнята до друку 10.06.2021.

Е. Б. ДЕМЧЕНКО, В. В. МАЛАШКИН, А. С. ДОРОШ, И. Я. СКОВРОН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Цель. В современных условиях задача усовершенствования систем хранения материальных запасов имеет значительную научную и практическую значимость. При этом характер и степень влияния параметров входящего потока грузов на потребное техническое оснащение складов с позиций логистики и системного подхода изучены недостаточно. Отсутствие окончательного решения задачи по разработке универсальной методики определения рациональных технических и технологических параметров складов тарно-штучных грузов сформулировало цель исследования, которая заключается в определении рационального оснащения складского комплекса на основе имитационного моделирования процесса его функционирования, формализованного сетью Петри. **Методика.** В работе авторами представлена методика формализации процесса функционирования транспортно-складского комплекса с помощью сети Петри в среде QPNet. Приведена методика технико-экономического сравнения вариантов оснащения складского комплекса, в основе которой лежит использование модифицированных приведенных затрат. **Результаты.** В работе выполнен обзор существующих имитационных моделей складских комплексов, определены их достоинства и недостатки. На основе выполненного анализа определена имитационная система для разработки модели складского комплекса. В статье приведена универсальная методика определения рациональных технических и технологических параметров складов тарно-штучных грузов с использованием имитационной модели склада, технологический процесс работы которого представлен сетью Петри. С разработанной имитационной моделью состава выполнена серия экспериментов, отличающихся эксплуатационными условиями функционирования, в результате чего получена совокупность технико-эксплуатационных показателей работы складского комплекса. Полученные показатели функционирования склада стали основой для определения его рационального технического оснащения. **Практическая значимость** представленной в работе методики построения универсальной модели складского комплекса и технико-экономической оценки показателей его функционирования позволит более точно определять рациональное количество технических средств и техническое оснащение при проектировании новых или реконструкции существующих транспортно-складских комплексов.

Ключевые слова: складской комплекс; имитационное моделирование; сеть Петри; оснащение складского комплекса; QPNet

Y. DEMCHENKO, V. MALASHKIN, A. DOROSH, I. SKOVRON

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF WAREHOUSE COMPLEXES USING PETRI NETS

The purpose. In modern conditions, the task of improving systems for storing material stocks has significant scientific and practical significance. At the same time, the nature and degree of influence of the parameters of the incoming flow of goods on the required technical equipment of warehouses from the standpoint of logistics and a systematic approach have been insufficiently studied. The absence of a final solution to the problem of developing a universal methodology for determining rational technical and technological parameters of warehouses for packaged goods formulated the goal of the study, which is to determine the rational equipment of a warehouse complex on the basis of simulation modeling of the process of its functioning, formalized by a Petri net. **Methodology.** In the work, the authors present a methodology for formalizing the process of functioning of a transport and warehouse complex using a Petri net in the QPNet environment. The technique of technical and economic comparison of options for equipping a warehouse complex, which is based on the use of modified reduced costs, is presented. **Results.** The paper reviews the existing imitation models of warehouse complexes, identifies their advantages and disadvantages. On the basis of the analysis performed, a simulation system was determined for the development of a model of a warehouse complex. The article presents a universal method for determining the rational technical and technological parameters of warehouses for packaged goods using a simulation model of a warehouse, the technological process of which is

represented by a Petri net. With the developed simulation model of the composition, a series of experiments were performed, differing in the operational conditions of operation, as a result of which a set of technical and operational indicators of the warehouse complex was obtained. The obtained indicators of the warehouse functioning became the basis for determining its rational technical equipment. **The practical significance** of the methodology presented in the work for constructing a universal model of a warehouse complex and a technical and economic assessment of the indicators of its functioning will make it possible to more accurately determine the rational number of technical means and technical equipment in the design of new or reconstruction of existing transport and warehouse complexes.

Keywords: warehouse complex; simulation modeling; Petri net; equipping a warehouse complex; QPNet