

Ковцур К.Г., Федоров В.Ю.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

РОЗРОБКА ПЛАНУ ЕКСПЕРЕМЕНТУ ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ В ПУНКТАХ ПЕРЕРОБКИ

Представлено план проведення моделювання процесу надходження вантажних автомобілів до пункту обслуговування з симуляцією динаміки формування черги з урахуванням відносного пріоритету в послідовності обслуговування автомобілів. З метою реалізації визначеної мети в рамках дослідження здійснено ґрунтовний аналіз та ідентифікацію законів розподілу ймовірностей стохастичних величин, зокрема моментів прибуття вантажних транспортних засобів та тривалості процедур обслуговування автомобілів. Отримані емпіричні й теоретичні результати слугуватимуть підґрунтям для подальшої математичної формалізації метрик, які характеризують тривалість перебування вантажних автомобілів у системах обслуговування.

Ключові слова: вантажний автомобіль, моделювання, вантажні перевезення, пункт переробки, черга, відносний пріоритет, час очікування.

ВСТУП

Визначення тривалості перебування вантажного транспорту в пунктах обслуговування дає змогу підвищити ефективність роботи й точніше оцінювати проекти розвитку системи доставки. У контексті сучасних викликів, таких як зростання обсягів вантажоперевезень, оптимізація ланцюгів постачань та забезпечення стійкості транспортної інфраструктури, надійні прогностичні моделі щодо цього параметра набувають особливого значення. Вони слугують не лише базовими вихідними даними для оптимізації процесів планування, проектування та оцінювання логістичних систем доставки вантажів, але й сприяють інтеграції передових технологій, таких як симуляційне моделювання та штучний інтелект, для підвищення загальної ефективності. Отже, завдання забезпечення високої точності та достовірності таких прогнозів набуває критичного значення в ширшому контексті загальної оцінки ефективності функціонування пунктів обслуговування, включаючи аналіз операційних витрат, зменшення простоїв та підвищення рівня сервісу для вантажоперевезень, що в підсумку сприяє економічному зростанню та екологічній стійкості транспортного сектору.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Слід зазначити, що задача прогнозування та моделювання роботи пунктів переробки з обслуговування вантажних автомобілів не є новою в науковому дискурсі, однак характеризується суттєвою складністю з позиції її математичної та алгоритмічної формалізації, що зумовлено багатопараметричністю стохастичних процесів і необхідністю врахування пріоритетних механізмів у системах черг.

В більшості наукових робіт представлені дослідження, де процес очікування обслуговування автомобілей визначається методом натурних обстежень [1]. У загальному випадку, при надходженні заявки з заданим пріоритетом, автомобіль розміщується в хвості черги. Перехід до обслуговування вимагає виконання таких умов: завершення поточного сервісного циклу для автомобілей, що займає пост; обробки всіх автомобілей, присутніх у черзі на момент прибуття; а також обслуговування автомобілей, що прибули надалі в інтервалі очікування, але з вищим пріоритетом, що забезпечує їхню пріоритетну обробку. Отже, у період очікування досліджуваного автомобіля реалізується стохастична ймовірність надходження вищопріоритетних автомобілей, які перетинають його в черзі, що фундаментально детермінує динаміку пріоритетної чергової системи масового обслуговування [2].

У роботі [3] детально описується процес обробки вантажівок на воротах складських або виробничих об'єктів. Зокрема, автори акцентують увагу на ключових етапах: прибутті транспортних засобів, їхньому входженні в чергу, безпосередньому завантаженні та розвантаженні біля воріт, а також завершальному виїзді з території. Цей підхід підкреслює циклічний характер операцій, де ефективність залежить від синхронізації всіх ланок ланцюга постачання.

Зазначена проблематика характерна не лише для пунктів обслуговування автомобільного транспорту. Ще більш гостро вона проявляється у сфері водного транспорту, де судна змушені

простоювати по кілька днів у черзі на обслуговування. Автори дослідження [4] акцентують увагу на негативних наслідках зростання вантажопотоків, яке підвищує ймовірність збоїв і затримок у перевезеннях. Будь-яка така затримка, за їхніми висновками, може спричинити порушення графіків роботи портів, постачань вантажів та ланцюгів постачань в цілому. Значні проблеми пов'язані з тривалими очікуваннями суден на обробку, а також неочікуваними затримками через погодні умови чи інші фактори, які призводять до зривів графіків і фінансових втрат. Крім того, брак інформації про готовність вантажу спричиняє рейдові простой суден, обмежуючи капітанів у виборі оптимального режиму руху. У контексті статті це джерело слугує основою для аналізу ризиків, пропонуючи інтеграцію інформаційних систем для мінімізації простоїв і підвищення стійкості логістичних мереж.

У роботі [5] розглянуто оптимізацію портових операцій, де автор пропонує зменшити час очікування та загальний час знаходження у системі суден через удосконалення процесів за допомогою методичного аналізу, що підвищує ефективність функціонування системи. Метод ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) виділяється як ефективний інструмент для підвищення ефективності роботи морського порту, на прикладі порту в провінції Songkhla Province (Таїланд). Крім того, планування графіків обслуговування вантажних автомобілів, зокрема модель Longest Processing Time (LPT), демонструє кращі результати в кейс-стаді для оптимізації зазначених операцій. Дослідження доводять, що зміна порядку обслуговування (черги) може мати значний вплив на ефективність роботи пунктів переробки. Слід зазначити, що висновки стосуються одного пункту переробки, що має один пост (кран розвантаження), що висуває певні обмеження на використання представлених результатів.

У статті [6] представлено базові принципи теорії черг та моделювання, а також визначено оптимальний режим обслуговування в системі черг для портового навантаження. Автори спираються на одновимірну модель, запропоновану попередніми дослідниками, яка фокусується на мінімізації витрат на обслуговування. На основі цього, вони пропонують нову двовимірну модель, яка дозволяє одночасно оптимізувати два ключові показники: ефективність обслуговування навантаження та кількість обладнання, забезпечуючи мінімальні витрати.

Метод апроксимації, залежний від стану системи, для оцінки довжини черги вантажних автомобілів на морських терміналах, з метою заповнення прогалин у існуючих підходах. На основі симуляції системи чергування вантажівок встановлено, що досягнення стабільного стану черги займає кілька годин, а ігнорування процесів формування черги (розсіювання) призводить до переоцінки (недооцінки) її довжини. Запропонований метод враховує як процеси формування, так і розсіювання черги для точнішої оцінки. Результати оцінки моделі демонструють, що вона забезпечує точніші та стійкіші оцінки порівняно з існуючими методами. Крім того, метод точно оцінює довжину черги, спричинену короткочасним перевантаженням у пікові години, що робить його корисним для аналізу ефективності заходів щодо зменшення заторів на морських терміналах. Модель також може застосовуватися для оцінки черг клієнтів у будь-яких сервісних об'єктах транспортної та логістичної галузі, де швидкість прибуття та обслуговування варіюється за часом, а перевантаження виникає в пікові періоди [7].

В роботі [8] запропоновано вдосконалений алгоритм мурашиної колонії для оптимізації процесу доставки і підбору контейнерів (з майданчиків до терміналу і навпаки) з використанням вантажного транспорту сторонніх компаній. Цей алгоритм модифікує правила оновлення феромонів порівняно з традиційним алгоритмом мурашиної колонії, а також вводить фактор впливу ширини часового вікна та ступінь відхилення часу в правилах переходу станів. Крім того, інтегровано алгоритм рою частинок (PSO) для автоматичного налаштування евристичних факторів впливу та факторів впливу феромонів, що покращує здатність уникати локальних оптимумів. Результати демонструють значне підвищення оптимізувальної здатності та стабільності порівняно з традиційним алгоритмом мурашиної колонії та алгоритмом змінного сусідства (VNS).

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною метою даного наукового дослідження є реалізація експериментального моделювання динаміки функціонування пункту обслуговування автомобільного транспорту протягом визначеного часового інтервалу, врахувавши стохастичних випадкових величини, що підкоряються заздалегідь ідентифікованим законам розподілу (зокрема, пуассонівському для інтервалів прибуттів та показниковому для тривалості сервісу), а також з неухильним дотриманням принципів відносної пріоритетності в процесі обслуговування, що дозволяє оптимізувати послідовність обробки заявок з урахуванням економічної ефективності та операційних обмежень. У контексті транспортних систем це дослідження набуває практичного значення, оскільки дозволяє прогнозувати та мінімізувати

простої вантажних автомобілів, враховуючи стохастичну природу процесів, і слугує основою для подальшої формалізації алгоритмів оптимізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тривалість перебування вантажного автомобіля у пункті обслуговування можна виразити як суму окремих часових інтервалів. Тривалість знаходження вантажного автотранспортного засобу в пункті обслуговування обумовлюється наступними факторами:

- час маневрування;
- час очікування обслуговування;
- час обслуговування;
- час прийому вантажу;
- час оформлення документів.

Час очікування обслуговування та безпосередній час обслуговування є стохастичними змінними з імовірнісною природою. На тривалість очікування впливають пріоритетність вантажу, що знаходиться в автомобілі, та час його прибуття до пункту обслуговування. Засновуючись на емпіричних даних щодо прибуття вантажних автомобілів до пункту обслуговування для пріоритету №1 (таблиця 1), проведений статистичний аналіз у програмному забезпеченні STATISTICA 12 мав на меті перевірку гіпотези про відповідність отриманого розподілу подій пуассонівському закону розподілу (рисунок 1). Для дослідження взято інтенсивності прибуття вантажних автомобілів з вантажем 1 пріоритету за добу (авт./добу) за період дослідження. Пуассонівський процес, як фундаментальна модель у теорії масового обслуговування, дозволяє адекватно описувати послідовність незалежних подій з фіксованою інтенсивністю (середньою кількістю прибуттів за одиницю часу. Такий підхід, широко застосовуваний у транспортних системах, полегшує аналітичне обчислення ключових метрик, таких як середній час очікування чи довжина черги.

Таблиця 1 – Емпіричні дані складових часу знаходження вантажних автомобілей у пункті обслуговування з вантажем 1 пріоритету.

Дата прибуття вантажного автомобіля	Час прибуття вантажного автомобіля	Дата початку обслуговування вантажного автомобіля	Час початку обслуговування вантажного автомобіля	Дата закінчення обслуговування вантажного автомобіля	Час закінчення обслуговування вантажного автомобіля	Дата виїзду вантажного автомобіля з пункту обслуговування	Час виїзду вантажного автомобіля з пункту обслуговування
30.06.2021	18:00:00	30.06.2021	18:14:00	30.06.2021	19:22:00	30.06.2021	19:59:00
30.06.2021	19:00:00	30.06.2021	20:15:00	30.06.2021	20:55:00	30.06.2021	21:25:00
30.06.2021	20:00:00	30.06.2021	22:20:00	30.06.2021	23:50:00	01.07.2021	0:45:00
01.07.2021	14:11:00	01.07.2021	17:10:00	01.07.2021	19:00:00	01.07.2021	19:40:00
01.07.2021	17:00:00	01.07.2021	20:40:00	01.07.2021	22:00:00	01.07.2021	22:40:00
01.07.2021	18:20:00	01.07.2021	20:30:00	01.07.2021	21:25:00	01.07.2021	22:00:00
01.07.2021	18:20:00	02.07.2021	4:32:00	02.07.2021	5:00:00	02.07.2021	5:55:00
01.07.2021	18:41:00	02.07.2021	0:10:00	02.07.2021	1:20:00	02.07.2021	2:20:00
01.07.2021	18:45:00	02.07.2021	2:20:00	02.07.2021	3:15:00	02.07.2021	4:30:00
01.07.2021	18:50:00	01.07.2021	21:45:00	01.07.2021	22:45:00	01.07.2021	23:35:00

01.07.20 21	18:55:00	01.07.2021	21:10:00	01.07.2021	22:35:00	01.07.2021	23:35:00
01.07.20 21	19:23:00	01.07.2021	21:00:00	01.07.2021	22:40:00	01.07.2021	23:40:00
01.07.20 21	19:34:00	02.07.2021	5:20:00	02.07.2021	6:20:00	02.07.2021	6:50:00
01.07.20 21	19:56:00	02.07.2021	1:40:00	02.07.2021	2:45:00	02.07.2021	3:20:00
01.07.20 21	22:30:00	02.07.2021	4:00:00	02.07.2021	5:20:00	02.07.2021	6:30:00
02.07.20 21	1:00:00	02.07.2021	3:00:00	02.07.2021	4:05:00	02.07.2021	4:40:00
02.07.20 21	10:12:00	02.07.2021	11:00:00	02.07.2021	12:20:00	02.07.2021	12:35:00
02.07.20 21	13:52:00	02.07.2021	15:50:00	02.07.2021	16:54:00	02.07.2021	17:10:00
02.07.20 21	15:09:00	02.07.2021	16:40:00	02.07.2021	17:56:00	02.07.2021	18:10:00
02.07.20 21	16:32:00	02.07.2021	19:00:00	02.07.2021	19:30:00	02.07.2021	19:50:00

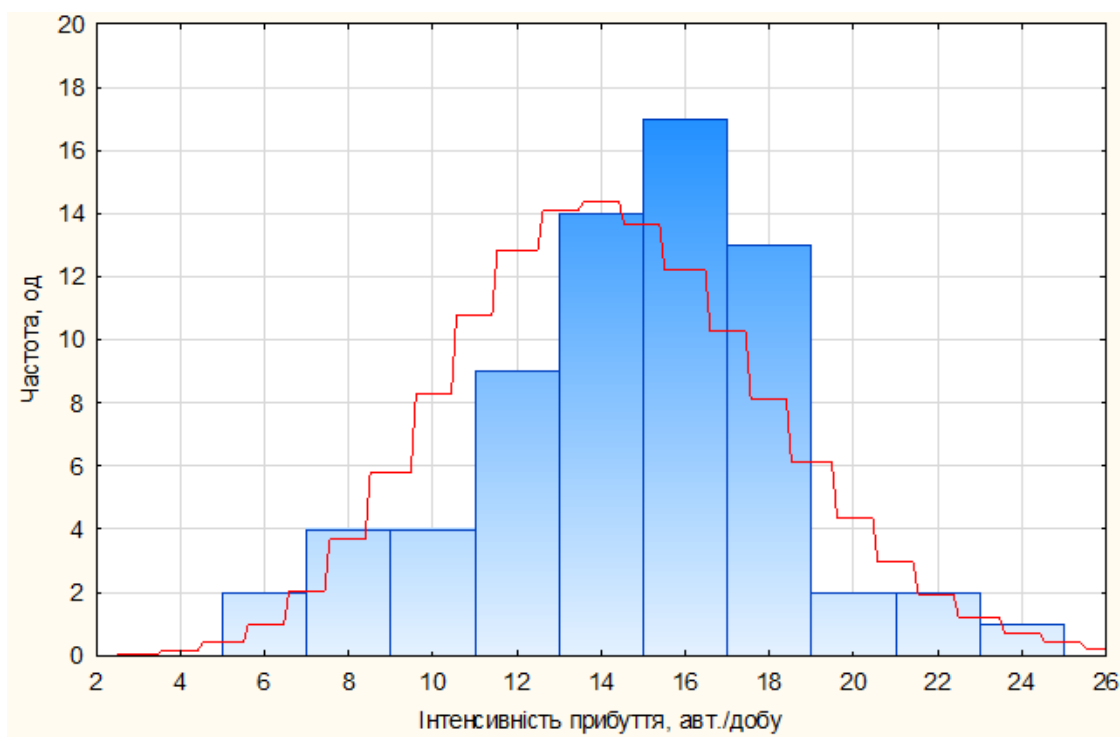


Рисунок 1 – Результат розрахунку закону Пуассона розподілу інтенсивностей прибуття вантажних автомобілей за добу протягом 70 днів автомобілів з вантажем 1 пріоритету до пункту обслуговування за допомогою STATISTICA 12

Проведений комплексний статистичний аналіз та обробка емпіричних даних, отриманих у ході спостережень за тривалістю обслуговування автомобілів у пункті обслуговування, дозволили встановити ступінь відповідності емпіричного розподілу часу обслуговування класичному експоненціальному закону розподілу. Ця закономірність підтверджується аналізом, наведеним на рисунку 2.

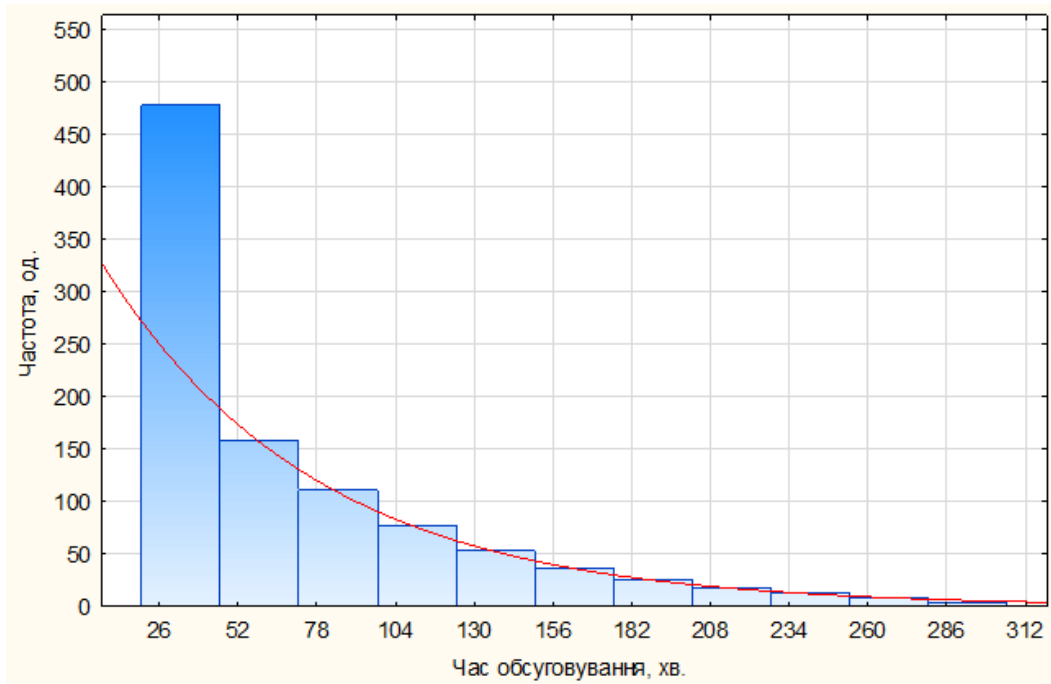


Рисунок 2 – Результат розрахунку експоненційного закону розподілу часу обслуговування вантажних автомобілей з вантажем 1 пріоритету за допомогою STATISTICA 12

Перевірка гіпотези про належність досліджуваної вибірки теоретичній кривій виду закону Пуассона проведена за критерієм відповідності Пірсона (таблиця 2)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_m)^2}{f_m}, \quad (1)$$

де k – число груп, на які розбито емпіричний розподіл,

f_i – спостережувана частота ознаки у i -й групі,

f_m – теоретична частота.

Кількість ступенів свободи визначається

$$df = k - s - 1, \quad (2)$$

де s – число параметрів передбачуваного розподілу, оцінених за даними вибірки.

Таким чином, отримані значення χ^2 підтверджують гіпотезу про розподіл інтенсивностей прибуття вантажних автомобілей до пункту обслуговування з вантажем 1 пріоритету та часу обслуговування цих автомобілей (таблиця 2).

Таблиця 2 – Показники визначення закону розподілу обсягу замовлень торгових точок «дрібних» форматів

Назва показника	Закон розподілу	Параметр розподілу	Показники визначення закону розподілу	
			$\chi^2_{\text{розн}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$ при $p=0,05$
Інтенсивність прибуття вантажних автомобілей з вантажем 1 пріоритету за добу	Пуассона	14,706	9,895	15,5

Час обслуговування вантажних автомобілей вантажем пріоритету	3 1	Експоненційний	71,597	12,121	16,9
---	--------	----------------	--------	--------	------

Наступним етапом дослідження є моделювання інтенсивності надходження вантажного автотранспорту до пункту технічного обслуговування з використанням методу нормальної апроксимації, що ґрунтується на пуассонівському законі розподілу для дискретної випадкової величини. Застосовуючи програмне забезпечення Microsoft Excel, реалізовано генерацію псевдовипадкових значень зі стандартного нормального розподілу за допомогою вбудованої функції

$$NORM.S.INV(RAND()), \quad (3)$$

Отримані значення слугують основою для апроксимації та моделювання інтенсивності прибуття автомобілів до пункту обслуговування відповідно до наступної формули:

$$X = \mu + \sigma \times Z, \quad (4)$$

де μ – середнє значення фактичної інтенсивності прибуття автомобілів у пункту обслуговування;
 σ – середньоквадратичне відхилення інтенсивності прибуття автомобілів у пункт обслуговування;
 Z – згенерована величина стандартного нормального розподілу.

Отримані згенеровані значення інтенсивності надходження автотранспорту створюють основу для подальшого стохастичного моделювання пуассонівського процесу прибуття транспортних засобів до пункту технічного обслуговування. Зокрема, для симуляції моментів прибуття застосовується функція Microsoft Excel:

$$GAMMA.INV(RAND(), B, 1/\bar{X}), \quad (5)$$

де B – номер заявки;

$\bar{X}$ – середнє значення згенерованої інтенсивності прибуття автомобілів у пункту обслуговування.

Застосовуючи експоненціальний закон розподілу, що є класичною моделлю для опису тривалості безпам'ятних процесів у системах масового обслуговування, реалізується стохастичне моделювання випадкових величин, які представляють час обслуговування транспортних засобів. Генерація таких величин проводиться за допомогою наступної функції Microsoft Excel:

$$\bar{T} \cdot \text{LOG}(RAND() \cdot 1), \quad (6)$$

де $\bar{T}$ – середнє значення фактичного часу обслуговування автомобілів.

Емпіричні натурні дослідження, проведені в реальних умовах функціонування логістичних вузлів та транспортних хабів, переконливо засвідчили, що динаміці послідовності обслуговування вантажних автомобілів притаманна модель відносної пріоритетності, яка ґрунтується не на фіксованих абсолютних характеристиках транспортних засобів (таких як тип вантажу чи габаритні параметри), а на динамічній пропорційній оцінці пріоритетів, що враховує поточні операційні умови, рівень завантаженості системи та економічні фактори. Ця модель, на відміну від традиційних жорстких ієрархій, дозволяє гнучко адаптуватися до варіативності потоків, забезпечуючи баланс між швидкістю обробки критичних заявок і загальною стабільністю процесу. Водночас, аналіз показує, що преривання обслуговування недообробленого вантажного автомобіля на користь пізніше прибувшого транспортного засобу з вищим відносним пріоритетом (наприклад, через терміновість доставки чи вищу комерційну цінність) виявляється економічно неефективним з кількох перспектив: по-перше, воно призводить до зростання загальних витрат на простой, оскільки перерване обслуговування вимагає додаткового часу на відновлення стану системи; по-друге, спричиняє

перерозподіл ресурсів (персоналу, обладнання та простору), що знижує пропускну спроможність пункту в середньостроковій перспективі; по-третє, негативно впливає на операційну продуктивність, посилюючи ризик накопичення черг і знижуючи рівень задоволеності клієнтів. У контексті теорії масового обслуговування така неефективність може бути кількісно оцінена через метрики, як-от середній час перебування в системі та коефіцієнт завантаження, де преривання підвищує дисперсію стохастичних процесів, що, в свою чергу, ускладнює прогнозування та оптимізацію. Таким чином, впровадження моделі відносної пріоритетності без механізмів захисту від преривань (наприклад, порогових правил чи буферних зон) не лише не сприяє загальній ефективності, а й може призвести до системних втрат, які перевищують короткострокові вигоди від пріоритизації. Для подальшої формалізації цієї моделі рекомендується інтеграція стохастичних симуляцій, заснованих на пуассонівських процесах прибуттів, з урахуванням емпіричних даних з натурних експериментів, що дозволить розробити рекомендації щодо оптимізації дисциплін обслуговування в реальних транспортних мережах.

Результатом даного наукового дослідження слугуватиме комплексне стохастичне моделювання динаміки функціонування вантажного пункту переробки вантажу (вантажного терміналу чи логістичного вузла) з варіативною кількістю каналів обслуговування, зокрема, для конфігурацій з одним, двома та трьома постами обслуговування, що дозволить оцінити вплив масштабу ресурсів на ключові операційні метрики, такі як середня довжина черги, час очікування та загальна пропускну спроможність системи. Дане моделювання, засноване на класичних засадах теорії масового обслуговування (пуассонівському процесі прибуттів та показниковому розподілі часу обслуговування), враховуватиме принципи відносної пріоритетності для уникнення неефективних преривань сервісу, як це рекомендовано емпіричними дослідженнями транспортних систем. Такий підхід не лише ілюструє перехід від одноканальної до багатоканальної конфігурації, де зростання кількості серверів знижує коефіцієнт завантаження і стабілізує систему, але й надає практичні рекомендації щодо оптимізації:

Такий аналітичний підхід, заснований на теорії масового обслуговування, продемонструє, залежність зміни часу очікування обслуговування вантажного транспорту, де ключовий фактор тривалості його перебування в пункті, залежно від інтенсивності прибуттів вантажних автомобілів та їх обслуговування. Додатково буде оцінено час обробки прибувчих автомобілів і простою постів, що виникає через неузгодженість потоків. Це слугуватиме інструментом для прогнозування в логістиці, з симуляціями для сценаріїв навантаження.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ключовою вимогою до стохастичного моделювання процесу обслуговування вантажного автотранспорту в пункті переробки вантажу є мінімізація непродуктивних простоїв, які призводять до суттєвих втрат в економічному аспекті (зростання операційних витрат на паливо та час) для всього ланцюга доставки. Це досягається через оптимізацію черг, де простої зменшуються за рахунок балансу інтенсивності вантажного автотранспорту та пропускну здатністю пункту переробки вантажу.

ВИСНОВКИ

Прогнозування динаміки функціонування пунктів переробки вантажу та вантажного автотранспорту слугуватиме потужним аналітичним інструментом для обґрунтованого прийняття рішень у стратегічному плануванні комплексних логістичних систем доставки, з урахуванням множинності стохастичних (наприклад, варіативність прибуттів за пуассонівським процесом) та детермінованих факторів (як конфігурація каналів обслуговування), що в підсумку сприяє конструюванню високоточних моделей на базі теорії масового обслуговування для оптимізації пропускну спроможності та мінімізації втрат. Такий підхід не лише підвищує точність прогнозів ключових метрик, але й інтегрує емпіричні дані з реальних пунктів переробки вантажів, дозволяючи моделювати сценарії з різними рівнями навантаження та забезпечувати стійкість ланцюгів постачань у автотранспортних мережах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Федоров В. Ю., Ковцур К. Г., Птиця Н. В. Взаємодія видів транспорту: особливості обслуговування транспортних засобів в пунктах переробки вантажів. *Розвиток транспорту*. (4(15), 2023. 123-130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>

2. Kovtsur K., Ptytsia N., Liubiyi Y., Fedorov V. An approach to determine vehicle idle time at unloading points. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2439, 020012-1–020012-11 <https://doi.org/10.1063/5.0068437>
3. Gultom, P., & Siregar, A. A. Analysis of the queuing system for the loading and un-loading of goods at PT Sinar Sosro Deli Serdang. *Journal of Mathematics Technology and Education*, 2(2), 2023. 231–247. <https://doi.org/10.32734/jomte.v2i2.9814>
4. Сагайдак О.І. Концепція оптимізації взаємодії судно-порт-вантаж з урахуванням наявних методик оцінки ризиків та використанням електронних технологій. *Розвиток транспорту*. 2(9), 2021. 64–77.
5. Woottichaiwat, S. Efficiency Improvement of Truck Queuing System in the Freight Unloading Process Case Study of a Private Port in Songkhla Province. *Science, Engineering and Health Studies*, 9(2), 2015. 52–58. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sehs/article/view/21467>
6. Xu Jingjing, Liu Dong. Queuing models to improve port terminal handling service. *Systems Engineering Procedia* 4:345–351. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.085>.
7. Wenrui Qu, Tao Tao, Bo Xie, Yi Qi. A state-dependent approximation method for estimating truck queue length at marine terminals. *Sustainability* 2021, 13(5), 2917. <https://doi.org/10.3390/su13052917>.
8. Huang P, Wang H, Tan F, Jiang Y, Cai J. Optimization of external container delivery and pickup scheduling based on appointment mechanism. *PLoS ONE* 20(2), 2025. e0318606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318606>

REFERENCES

1. Fedorov, V. Yu., Kovtsur, K. H., & Ptytsia, N. V. (2023). Interaction of transport modes: Features of servicing vehicles at cargo handling points. *Development of Transport*, 4(15), 123–130. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.10>
2. Kovtsur, K., Ptytsia, N., Liubiyi, Y., & Fedorov, V. (2021). An approach to determine vehicle idle time at unloading points. *AIP Conference Proceedings*, 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>
3. Gultom, P., & Siregar, A. A. (2023). Analysis of the queuing system for the loading and unloading of goods at PT Sinar Sosro Deli Serdang. *Journal of Mathematics Technology and Education*, 2(2), 231–247. <https://doi.org/10.32734/jomte.v2i2.9814>
4. Sahaidak, O. I. (2021). Concept of optimizing the interaction between ship, port, and cargo considering existing risk assessment methods and the use of electronic technologies. *Development of Transport*, 2(9), 64–77.
5. Woottichaiwat, S. (2015). Efficiency improvement of truck queuing system in the freight unloading process: Case study of a private port in Songkhla Province. *Science, Engineering and Health Studies*, 9(2), 52–58. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sehs/article/view/21467>
6. Xu, J., & Liu, D. (2011). Queuing models to improve port terminal handling service. *Systems Engineering Procedia*, 4, 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.11.085>
7. Qu, W., Tao, T., Xie, B., & Qi, Y. (2021). A state-dependent approximation method for estimating truck queue length at marine terminals. *Sustainability*, 13(5), 2917. <https://doi.org/10.3390/su13052917>
8. Huang, P., Wang, H., Tan, F., Jiang, Y., & Cai, J. (2025). Optimization of external container delivery and pickup scheduling based on appointment mechanism. *PLOS ONE*, 20(2), e0318606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318606>

K. Kovtsur, V. Fedorov. Development of an experimental plan for the truck maintenance process at recycling points

The paper discusses the development of a plan for experimental modeling of the process of servicing trucks at cargo handling points, aimed at improving logistics system efficiency and reducing vehicle downtime. The main focus is on simulating vehicle arrival and servicing dynamics under stochastic conditions, considering the principle of relative priority in their order of service. Using empirical data, the laws governing the probability distribution of random variables that characterize freight transport arrival times and service durations were identified. It was found that the arrival process follows the Poisson distribution, and service duration follows the exponential distribution, confirmed by statistical verification using Pearson's criterion.

The paper supports the idea that queuing theory and simulation modeling methods are useful for evaluating the efficiency of cargo processing points. A methodological approach to stochastic modeling of

the service process is proposed, based on algorithms for randomly generating arrival intervals and service durations within the Microsoft Excel environment using functions that implement Poisson and exponential distributions. The model incorporates the principle of relative priority, enabling adaptive changes in service sequences based on current operating conditions and economic considerations.

Study results indicate that implementing multi-channel service systems (with one to three stations) can significantly decrease average queue length and waiting times, while increasing system stability under varying traffic levels. This approach allows for predicting how long a vehicle stays in the system, identifying time losses, and providing recommendations for optimal resource allocation at service points. The findings can also be used for further mathematical formalization of logistics performance indicators and applied to other transport networks.

Overall, this research advances analytical and predictive methods in transport logistics, offering opportunities to reduce freight transport downtime and enhance the economic stability of cargo handling systems in current conditions.

Key words: truck, modeling, freight transportation, processing point, queue, relative priority, waiting time.

КОВЦУР Катерина Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kovtsyr@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>.

ФЕДОРОВ Віталій Юрійович, асистент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: vitaliiyf@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0940-6774>

Kateryna KOVTSUR, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kovtsyr@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0445-5438>.

Vitalii FEDOROV, Assistant of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: vitaliiyf@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0940-6774>

DOI 10.36910/automash.v2i25.1924