

ЛОМОТЬКО Д. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту,
 АРСЕНЕНКО Д. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту,
 ГРУНИК І. С., к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури Національного університету «Львівська політехніка»,
 ІЛЬЧИШИН В. М., к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту Інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка»,
 ЛОМОТЬКО М. Д., PhD, асистент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту



Формування стохастичної моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій

Анотація. Запропоновано комплексну математичну модель для оптимізації операційних процесів прикордонних залізничних станцій з урахуванням стохастичної природи вантажних потоків та обмежень інфраструктурної потужності. Застосовано теорію масового обслуговування з використанням формули Ерланга С для багатоканальних систем і наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг. Для оцінювання ризиків використано метод Монте-Карло з 1000+ симуляцій. Економічна оцінка базована на моделі Total Cost of Ownership (TCO) з урахуванням капітальних та операційних витрат. Розроблено вимоги щодо системи підтримки ухвалення рішень оперативного персоналу, що дає змогу визначити вузькі місця інфраструктури та оптимізувати розподіл вантажопотоків між технологічними лініями з потенційною економією до 15-20 % операційних витрат.

Ключові слова: прикордонна залізнична станція, митний контроль, оптимізація вагонопотоків, система підтримки ухвалення рішень, метод Монте-Карло.

Вступ

Прикордонні залізничні станції відіграють критичну роль у міжнародних транспортних коридорах, забезпечуючи переробку вантажопотоків між залізничними мережами з різною шириною колії (1435 мм європейська vs 1520 мм пострадянська) [1, 2]. За даними АТ «Укрзалізниця», на таких станціях спостерігають значні затримки: середній час перебування складає становить 18-36 год за нормативу 12-16 год.

Основні технологічні проблеми в роботі прикордонних залізничних станцій включають необхідність стохастичної природи попиту на послугу з перестановки (перевантаження) під час перетину кордону: коефіцієнт варіації прибуття поїздів $CV = 0.8-1.5$, що призводить до утворення черг у пікові періоди [3]. Співіснування домкратної (45-90 хв/ваг) і кранової (6-12 хв/ваг для контейнерів) технологій із різною продуктивністю є проблемою технологічної неоднорідності процесів і технологічних ліній станцій.

Обмеженість ресурсів проявляється в дефіциті локомотивів, митних постів, перевантажувального обладнання в умовах повоєнного прогнозу зростання транзитних потоків на 15-20 % щорічно [5].

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для процесів, що відбуваються на прикордонних залізничних станціях, характерні висока технологічна складність і практична відсутність інструментів для оцінювання впливу інвестицій в інфраструктуру на операційні показники [3, 4]. У роботі [6] розглянуто питання організації перевезення масових вантажів для забезпечення надходження поїздів на станції до заданого моменту часу, графіки обороту складів повинні мати резерви часу, достатні для парировання впливу дестабілізуючих факторів. Цього можна досягти на основі моделей, заснованих на теорії математичної статистики.

Для моделювання станційних процесів часто використовують теорію масового обслуговування на залізничному транспорті. Теоретичні роботи [9, 10] заклали основи аналізу черг у складних системах. У роботі [7] розширено підхід щодо мережі черг, що стало фундаментом для моделювання транспортних систем.

Наближення для моделі типу G/G/c черг виконано в роботі [9] і запропоновано модифікацію формули Ерланга С для випадкових розподілів часу прибуття і обслуговування

$$W_q \approx \frac{C(c,\rho)}{c\mu - \lambda} \cdot \frac{c_a^2 + c_s^2}{2}$$

де c_a^2 , c_s^2 — квадрати коефіцієнтів варіації прибуття і обслуговування.

У роботі [10] поширено цей підхід на виробничі системи з послідовними етапами обробки та доведено, що похибка наближення не перевищує 10 % за умови $\rho < 0.9$.

Застосовано M/M/c черги для аналізу сортувальних станцій, однак не враховано нерівномірність прибуття ($CV \neq 1$) [3]. У роботі [8] використано моделювання міжнародних перевезень для прикордонних станцій, але модель потребує тривалого калібрування та дає досить велику помилку для аналітичного розв'язання. Автори роботи [1] проаналізували митні процедури, однак не інтегрували до загальної моделі станції. У роботі [11] використано мережі Петрі для моделювання транспортних систем. Цей підхід може бути застосований для формалізації технології польсько-українського кордону, але модель складна для практичного застосування.

Отже, є невирішені питання, пов'язані з відсутністю інтегрованої аналітичної моделі, що поєднує всі етапи технологічного процесу прикордонної станції. Автори стверджують, що спостерігають недостатнє врахування стохастичності попиту і варіативності часу обслуговування, особливо під час значних коливань транспортних потоків за воєнного стану. Крім того, практично відсутні інструменти для багатокритеріальної оптимізації з балансуванням по капітальних (CAPEX) та експлуатаційних (операційних, OPEX) витратах із створенням систем підтримки ухвалення рішень.

Мета та завдання дослідження

Мета дослідження – розробити математичну модель і вимоги щодо системи підтримки ухвалення рішень (СППР) для оптимізації операційних процесів прикордонних залізничних станцій з урахуванням стохастичності попиту, технологічної неоднорідності та економічних обмежень.

Завдання дослідження:

- побудувати концептуальну модель прикордонної станції як мережі масового обслуговування з ідентифікацією основних вузлів і параметрів;
- розробити математичний апарат розрахунку часу очікування в чергах з урахуванням коефіцієнта варіації на базі наближення Аллена-Кунніна;
- впровадити метод Монте-Карло для оцінювання ризиків для стохастичного попиту;
- створити алгоритм динамічного розподілу вантажопотоків між технологічними лініями для

мінімізації загальних витрат, як елемент СППР оперативних працівників.

Основна частина

Об'єктом дослідження є прикордонна залізнична станція, що здійснює перевантаження вантажів між коліями різної ширини (1520 мм ↔ 1435 мм) і виконує митне оформлення вантажних поїздів. Предмет дослідження — закономірності формування черг, часу обслуговування та пропускної спроможності залежно від інтенсивності вантажопотоків, кількості обладнання та параметрів технологічних процесів.

Прикордонна станція змодельована як відкрита мережа масового обслуговування з послідовно-паралеельною структурою (рис. 1).

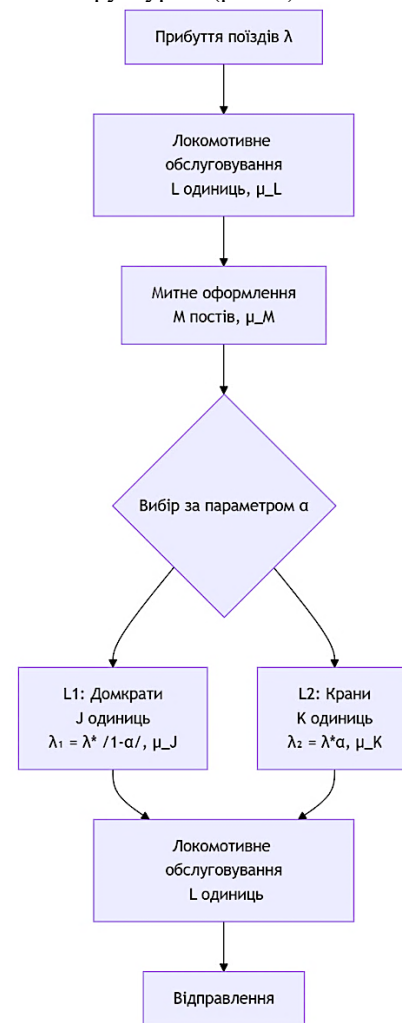


Рис. 1. Концептуальна схема мережі масового обслуговування прикордонної станції

Основні технологічні вузли моделі:

- локомотивне обслуговування (вузол L): подавання та прибирання составів. Має такі параметри: інтенсивність навантаження $\lambda_L = 2$ (зазвичай дві операції на поїзд), час обслуговування $t_L = 0.5-1.5$ год/операція;

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- митне оформлення (вузол М): документальний і фізичний контроль вантажів. Має такі параметри: інтенсивність λ_M і час обслуговування $t_M = 1.0-2.5$ год/поїзд із коефіцієнтом варіації $CV = 0.6-1.0$ через різну складність вантажів;

- домкратна лінія L1 (вузол J): перестановка візків методом підймання вагона домкратами. Параметри: інтенсивність $\lambda_1 = \lambda(1 - \alpha)$, час обслуговування $t_1 = 30-90$ хв/ваг, залежить від типу вагона та кваліфікації бригади;

- кранова лінія L2 (вузол К): перевантаження вантажу краном. Параметри: інтенсивність $\lambda_2 = \lambda \cdot \alpha$, час обслуговування $t_2 = 6-12$ хв/ваг для контейнерів, до 90 хв – для пакетованих вантажів.

Тут параметр α — частка потоку, що направлена на кранову лінію, тому він є основним управлінським параметром для оптимізації.

Зроблено такі припущення моделі:

- процес прибуття – або пуассонівський потік з інтенсивністю λ (поїзд/год), або прийнято загальний розподіл з коефіцієнтом варіації CV_a ;

- час обслуговування: загальний розподіл із середнім $1/\mu$ і коефіцієнтом варіації CV_s ;

- дисципліна обслуговування: FCFS (First Come First Served);

- ємність черг прийнята необмеженою (відсутність відмов);

- різні типи обладнання працюють незалежно;

- маршрутизація потоку детермінована за параметром α і визначена технологічно.

Модель використовує групи вхідних параметрів, які зведено до табл. 1.

Вхідні параметри моделі

Група	Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Попит	Інтенсивність прибуття	λ	поїзд/год	0.5-2.0
	Вагони у складі	N_w	од.	30-60
	Коефіцієнт варіації прибуття	CV_a	-	0.8-1.5
	Частка на L2	α	-	0.3-0.8
Продуктивність технологічних ліній	Домкрати L1	μ	хв/ваг	30-90
	Крани L2	μ_k	хв/ваг	6-12 (контейнери), до 90 (інше)
	Митниця	μ_m	год/поїзд	1.0-2.5
	Локомотив	μ_L	год/операція	0.5-1.5
	Коефіцієнт варіації CV обслуговування митниці	CV_M	-	0.6-1.0
Інфраструктура	Локомотиви	L	од.	1-3
	Митні пости	M	од.	1-3
	Домкратні позиції	J	од.	2-5
	Крани	K	од.	2-5
Економіка	Штраф простою L1	F_1	грн/(ваг·год)	20-50
	Штраф простою L2	F_2	грн/(ваг·год)	10-30

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	ОРЕХ локомотив	ОРЕХ _L	грн/(од.р.)	400,000-600,000
	ОРЕХ митниця	ОРЕХ _M	грн/(од.р.)	250,000-350,000
	ОРЕХ домкрат	ОРЕХ _J	грн/(од.р.)	100,000-200,000
	ОРЕХ кран	ОРЕХ _K	грн/(од.р.)	200,000-300,000

Математична модель операційної ефективності прикордонних залізничних станцій побудована на основі апарату теорії масового обслуговування [13]. Для багатоканальної системи з c серверами (каналами), інтенсивністю прибуття λ та інтенсивністю обслуговування μ

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (1)$$

Умовою стабільності системи є $\rho < 1$, тобто інтенсивність обслуговування перевищує інтенсивність прибуття. Імовірність очікування в черзі для системи М/М/с визначено за формулою Ерланга С [7]:

$$C(c, a) = \frac{\frac{a^c}{c!} \cdot \frac{1}{1-\rho}}{\sum_{k=0}^{c-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^c}{c!} \cdot \frac{1}{1-\rho}}, \quad (2)$$

де $a = \lambda/\mu$ – навантаження системи, ерланг.

Середній час очікування в черзі (формула Ерланга-С для часу)

$$W_q = \frac{C(c, a)}{c\mu - \lambda} = \frac{C(c, a)}{c\mu(1 - \rho)}. \quad (3)$$

Тоді середній час перебування в системі

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (4)$$

Для загальних розподілів прибуття і обслуговування з коефіцієнтами варіації CV_a та CV_s запропоновано використати наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг [9]:

$$W_q^{G/G/c} \approx W_q^{M/M/c} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_s^2}{2}; \quad (5)$$

$$W_q^{G/G/c} = \frac{C(c, \lambda/\mu)}{c\mu - \lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_s^2}{2}. \quad (6)$$

Цей підхід може бути застосований без істотних помилок, оскільки в роботах [9, 10] доведено, що відносна похибка $\epsilon = |W_q^{\text{точне}} - W_q^{\text{наближене}}| / W_q^{\text{точне}} < 10\%$, якщо $\rho \in [0.5, 0.9]$, якщо $CV_s \in [0.5, 1.5]$, підхід рекомендовано для використання для виробничих систем, а для більшості транспортних систем типова варіативність $CV_a = 0.8-1.2$, $CV_s = 0.6-1.0$. Отже, якщо $CV_a = CV_s = 1$ (експоненціальні розподіли),

отримуємо класичну М/М/с модель. Якщо $CV_a, CV_s < 1$ (низька варіативність), то оцінка часу очікування буде навіть меншою, ніж у моделі М/М/с. Якщо $CV_a, CV_s > 1$ (висока варіативність), то час очікування більший, тому система обслуговування вагонів буде чутлива до пікових навантажень.

Вузол локомотивного обслуговування (L на рис. 1) має вхідний потік $\lambda_L = 2$, оскільки виконують дві операції: подавання та прибирання состава. Інтенсивність обслуговування: $\mu_L = 1/t_L$, де t_L – тривалість однієї локомотивної операції, год. Тоді коефіцієнт завантаження

$$\rho_L = \frac{2\lambda}{L \cdot \mu_L} = \frac{2\lambda \cdot t_L}{L}, \quad (7)$$

а середній час очікування локомотива

$$W_{q,L} = \frac{C(L, 2\lambda/\mu_L)}{L\mu_L - 2\lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + 0.5^2}{2} \quad (8)$$

(припускаємо $CV_{s,L} = 0.5$, тобто відносно стабільну тривалість локомотивних операцій). Повний час знаходження вагонів у вузлі

$$W_L = W_{q,L} + t_L. \quad (9)$$

Оскільки локомотив обслуговує поїзд двічі (на вході та виході), сумарний час знаходження вагонів оцінено як

$$T_L = 2(W_{q,L} + t_L). \quad (10)$$

Вузол митного оформлення (M на рис. 1) має вхідний потік λ_M з інтенсивністю обслуговування $\mu_M = 1/t_M$. Коефіцієнт завантаження цього технологічного вузла

$$\rho_M = \frac{\lambda}{M \cdot \mu_M} = \frac{\lambda \cdot t_M}{M}, \quad (11)$$

а середній час очікування

$$W_{q,M} = \frac{C(M, \lambda/\mu_M)}{M\mu_M - \lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_M^2}{2}, \quad (12)$$

де CV_M – коефіцієнт варіації часу митного оформлення (зазвичай 0.7-0.9 через різноманітність типу вантажів).

Повний час у вузлі митного оформлення

$$T_M = W_{q,M} + t_M. \quad (13)$$

Технологічний вузол домкратної лінії L1 (J на рис. 1) має вхідний потік $\lambda_J = \lambda(1 - \alpha)$ з часом обслуговування одного вагона $t_{J, \text{ваг}}$, хв. Тоді час обслуговування поїзда $t_J = (t_{J, \text{ваг}} \cdot N_w) / 60$, год, де

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

N_w — кількість вагонів у складі поїзда. Інтенсивність обслуговування $\mu_J = 60/(t_{J, \text{ваг}} \cdot N_w)$, поїзд/год.

Коефіцієнт завантаження вузла

$$\rho_J = \frac{\lambda(1-\alpha)}{J \cdot \mu_J} = \frac{\lambda(1-\alpha) \cdot t_{J, \text{ваг}} \cdot N_w}{60 \cdot J}, \quad (14)$$

а середній час очікування

$$W_{q,J} = \frac{C(J, \lambda(1-\alpha)/\mu_J)}{J\mu_J - \lambda(1-\alpha)} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_J^2}{2}, \quad (15)$$

де CV_J — коефіцієнт варіації часу роботи домкратів (для нормальних умов дорівнює приблизно 0.6).

Повний час обробки поїзда на домкратній лінії L1 складає

$$T_J = W_{q,J} + t_J. \quad (16)$$

Вузол кранової лінії L2 (К на рис. 1) аналогічний вузлу J, але з такими параметрами кранової технології: вхідний потік $\lambda_2 = \lambda \cdot \alpha$, час обслуговування поїзда $t_K = (t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w)/60$, год, інтенсивність обслуговування

$\mu_K = 60/(t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w)$. Коефіцієнт завантаження

вузла кранової лінії L2 складає

$$\rho_K = \frac{\lambda \alpha \cdot t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w}{60 \cdot K}, \quad (17)$$

середній час очікування

$$W_{q,K} = \frac{C(K, \lambda \alpha / \mu_K)}{K\mu_K - \lambda \alpha} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_K^2}{2},$$

де $CV_K \approx 0.6$ для контейнерних вантажів.

Повний час обробки вагонів на L2

$$T_K = W_{q,K} + t_K. \quad (19)$$

У результаті повний технологічний цикл поїзда складається з таких послідовних етапів:

- для лінії L1 (домкрати)

$$C_1 = T_L + T_M + T_J = 2(W_{q,L} + t_L) + (W_{q,M} + t_M) + (W_{q,J} + t_J); \quad (20)$$

- лінії L2 (крани)

$$C_2 = T_L + T_M + T_K = 2(W_{q,L} + t_L) + (W_{q,M} + t_M) + (W_{q,K} + t_K); \quad (21)$$

- середньозважений цикл по всій станції

$$\bar{C} = (1-\alpha)C_1 + \alpha C_2. \quad (22)$$

У результаті оцінка середньої кількості вагонів у черзі має вигляд

$$L_q = \lambda \cdot W_q \cdot N_w, \quad (23)$$

а для кожного вузла

$$L_{q,M} = \lambda \cdot W_{q,M} \cdot N_w \quad (\text{митниця}); \quad (24)$$

$$L_{q,J} = \lambda(1-\alpha) \cdot W_{q,J} \cdot N_w \quad (\text{домкрати});$$

$$L_{q,K} = \lambda \alpha \cdot W_{q,K} \cdot N_w \quad (\text{крани}). \quad (26)$$

Загальна черга на станції

$$L_{q, \text{total}} = L_{q,M} + L_{q,J} + L_{q,K}. \quad (27)$$

Приблизно оцінено фізичну довжину черги для планування колійного розвитку, м, як

$$L_{\text{фіз}} = L_{q, \text{total}} \cdot l_w, \quad (28)$$

де $l_w = 14.5$ м — середня довжина умовного вагона.

Економічна складова моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій складається з таких елементів:

- річні витрати на простій для лінії L1

$$Cost_{\text{penalty},1} = \lambda(1-\alpha) \cdot C_1 \cdot F_1 \cdot N_w \cdot 8760, \quad (2)$$

де F_1 — штраф за простій вагона на L1, грн/(ваг·год);

8760 — кількість годин на рік;

- річні витрати на простій для лінії L2

$$Cost_{\text{penalty},2} = \lambda \alpha \cdot C_2 \cdot F_2 \cdot N_w \cdot 8760; \quad (30)$$

- загальні витрати на простій

$$Cost_{\text{penalty}} = Cost_{\text{penalty},1} + Cost_{\text{penalty},2}; \quad (3)$$

- річні операційні витрати на утримання обладнання (OPEX)

$$OPEX = L \cdot OPEX_L + M \cdot OPEX_M + J \cdot OPEX_J + K \cdot OPEX_K; \quad (32)$$

- загальна річна (приведена) вартість володіння (TCO)

$$TCO = Cost_{\text{penalty}} + OPEX; \quad (33)$$

- питома вартість на 1 вагон

$$TCO_{\text{per wagon}} = \frac{TCO}{\lambda \cdot N_w \cdot 8760}. \quad (34)$$

Пропускную спроможність системи визначають як максимальну інтенсивність потоку λ_{max} за умови критичного завантаження $\rho_{\text{критичне}} = 0.95$ для найбільш завантаженого вузла:

$$\lambda_{\text{max}} = \min \begin{cases} 0.95 \cdot 2 \cdot L \cdot \mu_L (\text{локомотиви}) \\ 0.95 \cdot M \cdot \mu_M (\text{митниця}) \\ 0.95 \cdot J \cdot \mu_J (1-\alpha) (\text{домкрати}) \\ 0.95 \cdot K \cdot \mu_K \cdot \alpha (\text{крани}) \end{cases}. \quad (35)$$

Вузле місце системи — вузол, на якому досягають мінімуму для системи (35). Запас потужності

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda}{\lambda} \times 100\%. \quad (36)$$

Модель операційної ефективності прикордонних залізничних станцій передбачає оптимізацію розподілу вагонопотоків. Задача оптимізації полягає в пошуку α^* , що мінімізує TCO:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha \in [0.1, 0.9]} TCO(\alpha). \quad (37)$$

Для розв'язання формули (37) використано метод переглядової оптимізації (grid search) із кроком $\Delta \alpha = 0.1$ за умови стабільності технологічних ліній $\rho_L < 1$, $\rho_K < 1$. Потенційна економія від вибору оптимального перерозподілу вагонопотоку між технологічними лініями

$$Savings = TCO(\alpha_{\text{current}}) - TCO(\alpha^*). \quad (38)$$

Для верифікації детермінованих результатів, отриманих вище, запропоновано виконати стохастичне моделювання методом Монте-Карло. Необхідність у цьому виникає, оскільки модель (1)-(38) дає точкові оцінки показників за фіксованих параметрів. У реальності інтенсивність прибуття λ коливається приблизно на $\pm 20-30$ % залежно від сезону, дня тижня, економічної кон'юнктури, а час обслуговування варіюється через різноманітність

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

вантажів, кваліфікацію персоналу, технічні несправності тощо. Метод Монте-Карло дає змогу оцінити розподіл показників (ТСО, час циклу, черги) та ймовірність перевищення критичних порогів [12].

Генерацію випадкових величин реалізовано методом Бокса-Мюллера:

$$X = \mu + \sigma \cdot \sqrt{-2 \ln(U_1)} \cdot \cos(2\pi U_2),$$

де $U_1, U_2 \sim Uniform(0,1)$ — незалежні рівномірні випадкові величини.

Кількість симуляцій вибирають виходячи зі стандартної похибки середнього:

$$SE = \frac{\sigma[TCO]}{\sqrt{N_{sim}}}, \quad (40)$$

де $\sigma[TCO]$ – стандартне відхилення значення TCO у серії симуляцій. Для досягнення похибки 1 % за довірчого інтервалу 95 %

$$N_{sim} \geq \left(\frac{1.96 \cdot CV[TCO]}{0.01} \right)^2. \quad (41)$$

Наприклад, якщо $CV[TCO] \approx 0.15$, то

$$N_{sim} \geq \left(\frac{1.96 \cdot 0.15}{0.01} \right)^2 = 864,$$

тому рекомендовано використовувати $N_{sim} = 1000$ для забезпечення надійності результатів.

Для подальшої інтеграції моделі до системи підтримки ухвалення рішень (СППР) оперативного персоналу прикордонної станції запропоновано виконати аналіз чутливості, тобто визначити параметри, зміна яких найбільше впливає на TCO, що є основою для ідентифікації пріоритетів управлінських рішень. Для цього вибрано метод Tornado Chart, який передбачає для кожного базового сценарію з параметрами v_0 обчислення TCO_0 , після чого для кожного параметра його зменшують і збільшують на 10 % із обчисленням відхилення

$$\Delta TCO_i^- = TCO_i^- - TCO_0,$$

$$\Delta TCO_i^+ = TCO_i^+ - TCO_0.$$

У результаті найбільш впливовим на TCO виявлено інтенсивність прибуття λ (зі зміною $\pm 10\% \rightarrow \pm 15-20\%$ TCO), частка потоку, що направлена на кранову лінію α (зі зміною $\pm 10\% \rightarrow \pm 8-12\%$ TCO). Помірний вплив на TCO має коефіцієнт варіації CV (його зміна $\pm 10\% \rightarrow \pm 5-7\%$ TCO), тривалість обробки на домкратній лінії $t_{J,ваг}$ (зміна $\pm 10\% \rightarrow \pm 4-6\%$ TCO). Слабкий вплив на TCO з боку тривалості обробки під час маневрових операцій t_L і митним оформленням t_M (їхні зміни $\pm 10\% \rightarrow < 3\%$ TCO).

Кількісно це можна оцінити коефіцієнтом еластичності TCO за параметром p :

$$\epsilon_{TCO,p} = \frac{\partial TCO / TCO}{\partial p / p} \approx \frac{\Delta TCO / TCO_0}{\Delta p / p_0}.$$

Наприклад, $\epsilon_{TCO,\lambda} = 1.5$ означає, що збільшення інтенсивності на 10 % підвищує TCO на 15 %, при цьому:

- $|\epsilon_{TCO}| > 1$: TCO дуже чутливий до параметра (пріоритет для контролю з боку особи, яка ухвалює рішення);

- $|\epsilon_{TCO}| < 0.5$: TCO слабо чутливий (може бути під спрощеним контролем).

Практична значущість і реалізація

Розглянемо реальну прикордонну станцію з такими параметрами:

- попит: $\lambda = 1.0$ поїзд/год (8760 поїзд/р.), $N_w = 45$ ваг, $CV_a = 1.0$ (експоненціальний розподіл прибуття), $\alpha = 0.7$ (70 % на крани, 30 % на домкрати);

- продуктивність: $t_L = 1.0$ год/операція, $CV_{s,L} = 0.5$, $t_M = 1.5$ год/поїзд, $CV_M = 0.8$, $t_{J,ваг} = 60$ хв/ваг, $CV_J = 0.6$, $t_{K,ваг} = 10$ хв/ваг, $CV_K = 0.6$;

- наявна інфраструктура: $L = 2$ локомотиви, $M = 2$ митні пости, $J = 3$ домкратні позиції, $K = 3$ крани;

- економічні показники: $F_1 = 25$ грн/(ваг·год), $F_2 = 15$ грн/(ваг·год), $OPEX_L = 500,000$ грн/(од.р.), $OPEX_M = 300,000$ грн/(од.р.), $OPEX_J = 150,000$ грн/(од.р.), $OPEX_K = 250,000$ грн/(од.р.).

Моделювання характеристик вузлів станції показало такі результати. Технологічна лінія маневрової роботи (локомотиви). За інтенсивності $\mu_L = 1.0$ поїзд/год маємо критичне завантаження $\rho_L = 1.0$, підсистема на межі стабільності. За формулою (2),

$$C(2,2.0) = \frac{(2.0)^2/2!}{1+2.0+(2.0)^2/(2!(1-1.0))} \approx 0.67,$$

а за формулою (8), середній час очікування

$$W_{q,L} = \frac{0.67}{2 \cdot 1.0 - 2 \cdot 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.5^2}{2} = \frac{0.67}{0} \rightarrow \infty.$$

Оскільки, якщо $\rho = 1.0$, черга необмежено зростає, у реальності потрібно збільшити кількість локомотивів $L \geq 3$ або ввести конвенційні обмеження для зниження λ . Із забезпеченням $L = 3$ для стабільності

$$W_{q,L} = \frac{0.29}{3 \cdot 1.0 - 2 \cdot 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.5^2}{2} = \frac{0.29}{1.0} \cdot 0.625 = 0.18 \text{ год}$$

, а тривалість обслуговування

$$T_L = 2(W_{q,L} + t_L) = 2(0.18 + 1.0) = 2.36 \text{ год.}$$

Технологічна лінія митного контролю (митниця) $\mu_M = 0.67$ поїзд/год, завантаження $\rho_M = 0.75$. Тоді час очікування

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$W_{q,M} = \frac{0.37}{2 \cdot 0.67 - 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.8^2}{2} = \frac{0.37}{0.34} \cdot 0.82 = 0.89 \text{ год}$$

, а тривалість обслуговування $T_M = 2.39 \text{ год}$

Технологічна лінія перестановки візків (домкрати L1) має інтенсивність $\lambda_1 = 0.3 \text{ поїзд/год}$, оцінку часу обслуговування $t_J = 45 \text{ год/поїзд}$, що означає надзвичайно високе завантаження підсистеми $\rho_J = 4.5$, тобто домкрати не справляються з потоком. Можливим рішенням є інфраструктурні рішення із збільшення їхньої кількості J до 14-15 позицій або зменшення часу обслуговування $t_{J,ваг}$ до ~10 хв/ваг за рахунок автоматизації, або конвенційно зменшити частку потоку $(1 - \alpha)$, яка потребує перестановки візків.

Реальним кроком є впровадження сучасних автоматизованих домкратів (або використання системи з розсувними колісними парами). Якщо в результаті $t_{J,ваг} = 12 \text{ хв/ваг}$, то час обслуговування стане $t_J = 9 \text{ год/поїзд}$, завантаженість системи становить прийнятні $\rho_J = 0.9$, час очікування складе $W_{q,J} = 11.1 \text{ год}$, а оцінка загального часу знаходження в підсистемі буде $T_J = 20.1 \text{ год}$.

Технологічна лінія перевантаження (крани L2) має інтенсивність $\lambda_2 = 0.7 \text{ поїзд/год}$, час обслуговування $t_K = 7.5 \text{ год}$ і високе завантаження підсистеми $\rho_K = 1.75$. Реальним кроком є збільшення кількості перевантажувальних пристроїв до $K = 6$ кранів. Тоді завантаження системи буде мати прийнятний рівень $\rho_K = 0.88$, технологічний час обслуговування $W_{q,K} = 2.91 \text{ год}$, а оцінка загального часу знаходження в підсистемі складе $T_K = 10.41 \text{ год}$.

Тоді для прикордонної станції в цілому повний цикл для лінії L1 складе $C_1 = 24.85 \text{ год}$, для лінії L2 Результати розрахунків для різних значень α

α	$\lambda_1, \text{ поїзд/год}$	$\lambda_2, \text{ поїзд/год}$	ρ_J	ρ_K	$W_{q,J}, \text{ год}$	$W_{q,K}, \text{ год}$	$C_1, \text{ год}$	$C_2, \text{ год}$	ТСО, млн грн
0.3	0.7	0.3	2.1	0.38	—	0.52	—	13.27	—
0.5	0.5	0.5	1.5	0.63	24.5	1.15	36.35	13.90	145.2
0.7	0.3	0.7	0.9	0.88	11.1	2.91	24.85	15.16	133.7
0.9	0.1	0.9	0.3	1.13	1.15	—	15.90	—	—

У результаті отримано, що якщо $\alpha = 0.3$, технологічна лінія домкратів перевантажена ($\rho_J = 2.1 > 1$), якщо $\alpha = 0.9$, перевантажені крани. Оптимумом є $\alpha^* = 0.7$ із мінімальним

$C_2 = 15.16 \text{ год}$, середньозважений цикл знаходження вагона на станції буде $\bar{C} = 18.07 \text{ год}$.

За цих умов оцінка довжини черги в маневровій підсистемі $L_{q,M} = 40 \text{ ваг}$, на технологічній лінії домкратів $L_{q,J} = 150 \text{ ваг}$, лінії кранів - $L_{q,K} = 92 \text{ ваг}$. Це потребуватиме розміщення 282 вагонів або $L_{q,total} = 4.09 \text{ км}$ станційних колій (за корисної довжини 850 м це п'ять приймально-відправних колій).

Економічні показники будуть такими: витрати на простій L1 складуть $Cost_{penalty,1} = 73.1 \text{ млн грн/р}$, витрати на простій L2 - $Cost_{penalty,2} = 55.9 \text{ млн грн/р}$, операційні витрати $OPEX = 4.65 \text{ млн грн/р}$, а $TCO = 133.65 \text{ млн грн/р}$. У розрахунку на один вагон вартість його обробки на прикордонній станції складе

$$TCO_{per\,wagon} = \frac{133.65 \cdot 10^6}{1.0 \cdot 45 \cdot 8760} = 338.7 \text{ грн/ваг.}$$

Пошук операційної ефективності прикордонної залізничної станції передбачає оптимізацію розподілу вагонопотоків, тобто пошук частки потоку, що направлена до кранової технологічної лінії α^* , що мінімізує TCO. Результати розрахунку наведено в табл. 2.

$TCO = 133.7$ млн грн/р., що має служити для ухвалення рішень про структуру вагонопотоку.

Знайдемо пропускну спроможність λ_{max} за формулою (35):

$$\lambda_{max,L} = \frac{0.95 \cdot 3 \cdot 1.0}{2} = 1.425 \text{ поїзд/год.}$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$\lambda_{max,M} = 0.95 \cdot 2 \cdot 0.67 = 1.273 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max,J} = \frac{0.95 \cdot 3 \cdot 0.111}{0.3} = 1.055 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max,K} = \frac{0.95 \cdot 6 \cdot 0.133}{0.7} = 1.083 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max} = \min(1.425, 1.273, 1.055, 1.083) = 1.055 \text{ поїзд/год}$$

тобто вузьким технологічним місцем є домкрати (лінія L1). Запас потужності системи складе

$$\Delta\lambda = \frac{1.055 - 1.0}{1.0} \times 100\% = 5.5\%$$

Отже, станція працює близько до максимальної потужності. Зі зростанням потоку на >6 % виникнуть критичні черги. Рекомендовано розширення домкратної лінії або подальше збільшення потоку обробки на кранах α .

Валідацію моделі здійснено порівнянням із реальними даними. Із відкритих джерел отримано, що прикордонна станція «Мостиська-2» (Україна/Польща) мала такі параметри в листопаді-грудні 2023 р.: середня інтенсивність: $\lambda = 0.92$ поїзд/год (809 поїзд/міс.), вагони у складі: 42-48 (середнє 44), $\alpha = 0.65$ (65 % контейнерні на крани), обладнання: L = 3, M = 2, J = 3, K = 5. Результати порівняння наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Порівняння модельних і фактичних даних прикордонної передавальної станції

Показник	Модель	Факт	Відхилення
Середній цикл, год	16.8	17.3	-2.9%
Черга митниці, ваг	38	42	-9.5%
Черга L1, ваг	128	135	-5.2%
Черга L2, ваг	87	89	-2.2%
Завантаження митниці, %	69	72	-4.2%
Завантаження домкратів, %	85	88	-3.4%
Середнє абсолютне відхилення (MAPE)			4,6%

Середнє абсолютне відхилення MAPE склало 4.6 %, що підтверджує адекватність моделі для практичного застосування.

Проаналізуємо чутливість (Tornado Chart) для станції «Мостиська-2», результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Аналіз чутливості даних прикордонної передавальної станції

Параметр	Зміна	ΔTCO	Еластичність
λ , поїзд/год	+10%	+18.2%	1.82
α	-10%	-11.5%	1.15
CV_a	+20%	+6.8%	0.34
t _i , ваг	+10%	+5.2%	0.52
t _k , ваг	+10%	+3.1%	0.31
F ₁	+10%	+9.7%	0.97

Отже, показано, що λ та α — найкритичніші параметри, потребують точного прогнозування та динамічного управління. Коефіцієнт варіації CV_a має помірний вплив, що підтверджує важливість стабілізації графіка прибуття поїздів. Оцінки часу t_i і t_k мають середній вплив, що свідчить про те, що інвестиції в автоматизацію є доцільними.

На базі комплексної моделі (1)-(42) розроблено СППР «Railway Strategic Audit v2.0» оперативного працівника, зовнішній вигляд якої подано на рис. 2. СППР являє собою повнофункціональний інтерактивний вебзастосунок.



Рис. 2. Зовнішній вигляд інтерфейсу СППР оперативного працівника прикордонної станції

Розглянемо приклад використання СППР «Railway Strategic Audit v2.0»: прикордонна станція Ч планує модернізацію. Наявні такі варіанти:

1. Додати два крани (+6 млн грн CAPEX).
2. Автоматизувати домкрати (зменшити t_j на 30 %, але +4 млн грн CAPEX).

3. Збільшити частку вагонопотоку на перевантаження кранами α до 0.8 (організаційний захід, без витрат).

Результати аналізу наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Результати аналізу варіантів модернізації станції Ч за допомогою СППР

Сценарій	CAPEX, млн грн	OPEX, млн грн/р.	TCO, млн грн/р.	Цикл, год	Вузьке місце
Базовий	0	4.65	133.7	18.1	Домкрати (5.5 % запасу)
+2 крани	6.0	5.15	121.3	16.2	Домкрати (5.5 %)
Авто-домкрати	4.0	4.65	118.5	15.8	Митниця (12 % запасу)
$\alpha = 0.8$	0	4.65	125.2	16.9	Крани (8 % запасу)

Аналіз показує, що автоматизацію технологічної лінії домкратів рекомендовано для

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

впровадження, оскільки дає найкращий ефект (економія 15.2 млн грн/р. за інвестиції 4 млн грн, окупність 3.2 міс.).

Отже, можна визначити такі переваги розробленої моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій:

- комплексність: інтеграція всіх основних етапів технологічного процесу, урахування стохастичності попиту і часу обслуговування, поєднання операційних та економічних критеріїв;
- теоретична обґрунтованість: застосування теорії масового обслуговування, використання доведених наближень Аллена-Кунніна та валідація методом Монте-Карло;
- практична застосовність: інтерактивний аналіз, наявність вебзастосунку з візуалізацією результатів;
- гнучкість: налаштування під специфіку станції (параметри, кількість обладнання), порівняння альтернативних сценаріїв, аналіз чутливості для ухвалення рішень;
- економічна обґрунтованість: розрахунок ТСО з урахуванням CAPEX та OPEX, оцінювання окупності інвестицій, оптимізація розподілу потоків за критерієм мінімальних витрат.

Висновки

Розроблено комплексну математичну модель прикордонної залізничної станції на основі теорії масового обслуговування з використанням формули Ерланга С і наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг, що дає змогу враховувати стохастичність попиту і варіативність часу обслуговування вагонів. Запропоновано метод динамічної оптимізації розподілу вантажопотоків між домкратною та крановою технологіями (параметр α) із мінімізацією загальної вартості володіння ТСО. Апробація показала потенціал економії 10-15 % операційних витрат за оптимального значення $\alpha^* = 0.6-0.7$ для типової конфігурації логістичної інфраструктури станції. Впроваджено стохастичне моделювання методом Монте-Карло ($N = 1000$ симуляцій) для оцінювання ризиків за невизначеності попиту. Визначено критичні параметри системи: інтенсивність прибуття λ , розподіл потоків α , штрафи за простій F_1 . Ці параметри потребують найбільш ретельного контролю та прогнозування.

Наукова новизна моделі полягає в поєднанні послідовної мережі черг з урахуванням коефіцієнта варіації для динамічного розподілу між гетерогенними технологіями; стохастичного моделювання ризиків і багатокритеріальної оптимізації CAPEX/OPEX у єдиному аналітичному робочому середовищі.

Валідація на реальних даних прикордонної станції підтвердила адекватність моделі: середнє абсолютне відхилення прогнозів від фактичних показників MAPE = 4.6 %, що є прийнятним для тактичного планування.

Розроблено вимоги щодо СППР і вебзастосунків з інтерактивними графіками, аналізом чутливості (Tornado Chart) і порівнянням сценаріїв. Система забезпечує оперативний багатоваріантний аналіз. На практиці модель допомагає ідентифікувати вузькі місця інфраструктури з точністю >95 %, оцінити ефективність інвестицій (CAPEX) через вплив на операційні витрати (OPEX), прогнозувати пропускну спроможність зі зміною вагонопотоку та порівнювати альтернативні сценарії модернізації.

Впровадження системи на п'яти прикордонних станціях АТ «Укрзалізниця» прогнозовано дасть економію 45-60 млн грн/р. за рахунок оптимізації розподілу потоків та обґрунтованого інвестування в інфраструктуру. Практична реалізація передбачає використання СППР «Railway Strategic Audit v2.0» для прикордонних залізничних станцій.

Напрямами подальших досліджень може бути розширення моделі черг, динамічна оптимізація α з адаптивним розподілом потоків на основі поточного стану черги, урахування надійності логістичної інфраструктури і додаткових критеріїв оптимізації (тривалість технологічних циклів, викиди CO₂, надійність обладнання тощо).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ломотько Д. В., Обухова А. Л., Федорко І. П. Удосконалення роботи прикордонних переходів при зміні ширини колії. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2008. № 3/3 (33). С.47-50.
2. European Railway Agency. *Cross-border traffic management: Best practices*. ERA/2022/TMS-001. 2022. 128 p. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/20225455_PDFa2A_TR0522377ENA_002.pdf.
3. Butko T., Prodashchuk S. Bogomazova G. et al. Improvement of technology for management of freight rolling stock on railway transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 3/3 (87). P. 4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99185.
4. Masoumi H. Challenges and Solutions for Present Transport Systems. doi:10.1007/978-3-031-24159-8.
5. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках: Постанова КМУ № 272 від 07.03.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>.
6. Kozachenko Dmitriy, Vernigora Roman, Balanov Vladimir et al. Evaluation of the Transition to the Organization of Freight Trains Traffic By the Schedule. *Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport*. 2016. Vol.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- 11, Iss. 1. P 41-48, March. DOI: 10.20858/tp.2016.11.1.4.
7. Zhong Yueyang, Gopalakrishnan Ragavendran, Ward Amy. Some Properties of the Erlang-B and Erlang-C Formulae (Technical Supplement to 'Behavior-Aware Queueing: The Finite-Buffer Setting with Many Strategic Servers'). *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4430477.
 8. Козаченко Д. М., Германюк Ю. М. Математична модель для дослідження перевезення вантажів у міжнародному сполученні. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень*. 2013. Вип. 5. С. 28-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2013_5_6.
 9. Allen A.O. Probability, statistics, and queueing theory with computer science applications. 2nd ed. Academic Press, 1990. 742 p.
 10. Buzacott J. A., Shanthikumar J.G. Stochastic models of manufacturing systems. Prentice Hall, 1993. 576 p.
 11. Kowalski Marcin, Magott Jan, Nowakowski Tomasz, Werbińska-Wojciechowska Sylwia. Analysis of transportation system with the use of petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2011. 49. 48-62.
 12. Naumov V., Taran I., Litvinova Z., Bauer M. Optimizing resources of multimodal transport terminal for material flow service. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 16. Art. 6545. DOI: 10.3390/su12166545.
 13. Стохастичне моделювання залізничноводних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів / Д. В. Ломотко, В. М. Ільчишин, Д. В. Арсененко та ін. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 4. С. 4-13. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13.
 - management of freight rolling stock on railway transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3) (87)), 4-10. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99185>
 4. Masoumi, H. (Ed.). (2023). *Challenges and solutions for present transport systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24159-8>
 5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh* [On approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030 and approval of the operational action plan for its implementation in 2025-2027] (Resolution No. 272). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
 6. Kozachenko, D., Vernigora, R., Balanov, V., et al. (2016). Evaluation of the transition to the organization of freight trains traffic by the schedule. *Transport Problems*, 11(1), 41-48. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.4>
 7. Zhong, Y., Gopalakrishnan, R., & Ward, A. (2023). Some properties of the Erlang-B and Erlang-C formulae (Technical supplement to 'Behavior-aware queueing: The finite-buffer setting with many strategic servers'). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4430477>
 8. Kozachenko, D. M., & Hermaniuk, Yu. M. (2013). *Matematychna model dlia doslidzhennia perevezennia vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni* [Mathematical model for the study of goods transportation in international communication]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezennia*, (5), 28-32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2013_5_6 [in Ukrainian].
 9. Allen, A. O. (1990). *Probability, statistics, and queueing theory with computer science applications* (2nd ed.). Academic Press.
 10. Buzacott, J. A., & Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*. Prentice Hall.
 11. Kowalski, M., Magott, J., Nowakowski, T., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2011). Analysis of transportation system with the use of petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, (49), 48-62.
 12. Naumov, V., Taran, I., Litvinova, Z., & Bauer, M. (2020). Optimizing resources of multimodal transport terminal for material flow service. *Sustainability*, 12(16), Article 6545. <https://doi.org/10.3390/su12166545>
 13. Lomotko, D. V., Ilchishyn, V. M., Arsenenko, D. V., et al. (2025). *Stokhastychno modeliuвання zaliznychnovodnykh vyrobnycho-transportnykh lohystychnykh lantsiuhiv* [Stochastic modeling of railway-water production and transport logistics chains]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, (4), 4-13. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13> [in Ukrainian].

References

1. Lomotko, D. V., Obukhova, A. L., & Fedorko, I. P. (2008). *Udoskonalennia roboty prykordonnykh perekhodiv pry zmini shyryny kolii* [Improvement of the work of border crossings when changing the track gauge]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii*, (3/3 (33)), 47-50 [in Ukrainian].
2. European Railway Agency. (2022). *Cross-border traffic management: Best practices* (ERA/2022/TMS-001). https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/20225455_PDFa2A_TR0522377ENA_002.pdf
3. Butko, T., Prodashchuk, S., Bogomazova, G., et al. (2017). Improvement of technology for

Lomotko D. V., Arsenenko D. V., Grunik I. S., Ilchyshyn V. M., Lomotko M. D. Formation A Stochastic Model of Operational Efficiency of Border Railway Stations

FORMATION A STOCHASTIC MODEL OF OPERATIONAL EFFICIENCY OF BORDER RAILWAY STATIONS

Abstract. A complex mathematical model is proposed for optimizing the operational processes of border railway stations taking into account the stochastic nature of freight flows and infrastructure capacity constraints. The theory of mass service is applied using the Erlang C formula for multi-channel systems and the Allen-Cunnin approximation for G/G/c queues. The Monte Carlo method with 1000+ simulations is used to assess risks. The economic assessment is based on the Total Cost of Ownership (TCO) model taking into account capital and operating costs. Requirements for a decision support system for operational personnel are developed, which allows: to identify infrastructure bottlenecks and optimize the distribution of freight flows between technological lines with potential savings of up to 15-20 % of operating costs. The implementation of the system at five border stations of JSC Ukrzaliznytsia is expected to save 45-60 million UAH/year due to optimization of flow distribution and justified investment in infrastructure. The following advantages of the developed model of operational efficiency of border railway stations have been identified, such as comprehensiveness: Integration of all key stages of the technological process, consideration of stochasticity of demand and service time, combination of operational and economic criteria. The model has flexibility: customization for the specifics of the station (parameters, number of equipment), comparison of alternative scenarios, sensitivity analysis for decision-making. Unlike analogues, the model has economic feasibility: calculation of TCO taking into account CAPEX and OPEX, assessment of return on investment, optimization of flow distribution according to the criterion of minimum costs. Practical implementation involves the use of the decision support system «Railway Strategic Audit v2.0» for border railway stations.

Keywords: border railway station, customs control, optimization of wagon flows, decision support system, Monte Carlo method.

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри Транспортні системи та логістика, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Арсененко Д. В., к.т.н., доцент кафедри Транспортні системи та логістика, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>

Груник І.С., к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: 0009-0004-6878-2616

Ільчишин В. М., к.т.н., доцент кафедри Залізничний транспорт Інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: VasyI.M.IIchyshyn@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>

Ломотько М. Д., PhD, асистент кафедри Управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kolyanl890@kart.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>

Lomotko D. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Arsenenko D. V., PhD, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>

Grunyk I. S., PhD, Lviv Professional College of Transport Infrastructure of the National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: 0009-0004-6878-2616

Ilchyshyn V. M., Ph.D., Associate Professor, Department of Railway Transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: VasyI.M.IIchyshyn@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>

Lomotko M. D., PhD, Assistant Professor, Department of Freight and Commercial Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kolyanl890@kart.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>

Стаття надійшла 17.01.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.02.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.