

УДК 656.212:519.87

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ФРОНТІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПІД'ЇЗНИХ КОЛІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RAMS-ПІДХОДУ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, канд. техн. наук Д. С. Лючков, Phd М. Д. Ломотко, канд. філол. наук С. М. Донець

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF RAILWAY ACCESS TRACK LOADING/UNLOADING FRONTS USING THE RAMS APPROACH

Dr. of Technical Sciences D. V. Lomotko, Cand. of Technical Sciences D. S. Lyuchkov, Phd M. D. Lomotko, PhD S. M. Donets

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371332>



Анотація. Стаття присвячена розробленню багатокритеріальної математичної моделі оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) відповідно до стандарту EN 50126 (IEC 62278). Система «станція — під'їзна колія» формалізована як багатоканальна система масового обслуговування М/М/З із використанням формули Ерланга-С, що дає змогу врахувати стохастичний характер вагонопотоку. Цільова функція побудована з урахуванням 14 компонентів витрат і двох конкуруючих стейкхолдерів — залізниці (мінімізація операційних витрат, простой і черг) і вантажовласника (мінімізація заморожування капіталу і власних експлуатаційних витрат), що обумовлює багатокритеріальний характер задачі.

Головною науковою новизною є введення детермінованого еквівалента *chance-constrained* задачі $Z_{\min}(\text{RAMS})$, який урахує коефіцієнт варіації вхідного вагонопотоку (CV_N) і готовність накопичувально-розподільних машин (A_{HPM}) через ефективні параметри системи μ_{eff} і $T_{\text{sys_eff}}$. Показано, що традиційна детерміністична оптимізація систематично занижує необхідну кількість НРМ: для типового сценарію ($CV_N = 0,30$, $A_{\text{HPM}} = 0,95$, рівень надійності $\alpha = 0,95$) детерміністичний розрахунок дає $Z_{\min} = 5$, тоді як RAMS-обмеження потребують $Z_{\min} = 7$, що на 40 % більше. Запропонована стохастична ризикова надбавка $C_{11}(\text{RAMS})$ із множителем $(1+z_{\alpha} \cdot CV_N)$ допомагає кількісно оцінити економічні наслідки нехтування варіативністю потоку.

На основі числового прикладу (зернова під'їзна колія, $N_{\text{заг}} = 34$ ваг/доба) виконано порівняльний аналіз варіантів оптимізації для обох стейкхолдерів, побудовано таблиці чутливості ($Z_{\min}(\text{RAMS})$ від CV_N та A_{HPM} , компоненти ТСО залежно від Z , динаміка параметрів протягом року) і сформовано дерево цілей RAMS. Верифікація моделі на фактичних даних показала відхилення модельних значень від облікових не більше 6 % (за критерієм Фішера). Результати можуть бути використані для технологічного нормування часу обробки вагонів, обґрунтування інвестиційних рішень про кількість НРМ і формування договірних умов між залізницею і вантажовласниками з урахуванням стохастичних ризиків.

Ключові слова: залізнична під'їзна колія, RAMS-аналіз, теорія масового обслуговування, формула Ерланга-С, *chance-constrained* оптимізація, вантажний фронт, EN 50126, стохастичне моделювання.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Ломотко Д. В., Лючков Д. С., Ломотко М. Д., Донець С. М., 2026.

Abstract. The article is devoted to the development of a multi-criteria mathematical model for optimizing the parameters of the operation of freight fronts of railway access tracks with the integration of RAMS analysis (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) in accordance with the EN 50126 (IEC 62278) standard. The station-access track system is formalized as a multi-channel M/M/Z mass transit system using the Erlang-C formula, which allows taking into account the stochastic nature of the train flow. The objective function is constructed taking into account 14 cost components and two competing stakeholders – the railway (minimization of operating costs, downtime and queues) and the cargo owner (minimization of capital freezing and own operating costs), which determines the multi-criteria nature of the problem.

The key scientific novelty is the introduction of a deterministic equivalent of the chance-constrained problem $Z_{\min}(\text{RAMS})$, which takes into account the coefficient of variation of the incoming car flow (CV_N) and the readiness of the storage and distribution machines (A_{HRM}) through the effective system parameters μ_{eff} and $T_{\text{sys_eff}}$. It is shown that traditional deterministic optimization systematically underestimates the required number of HRM: for a typical scenario ($CV_N = 0.30$, $A_{\text{HRM}} = 0.95$, reliability level $\alpha = 0.95$) the deterministic calculation gives $Z_{\min} = 5$, while the RAMS constraints require $Z_{\min} = 7$, which is 40 % more. The proposed stochastic risk premium $C_{11}(\text{RAMS})$ with the multiplier $(1 + z_{\alpha} \cdot CV_N)$ allows us to quantitatively assess the economic consequences of neglecting the variability of the flow.

Based on a numerical example (grain approach track, $N_{\text{row}} = 34$ weights/day), a comparative analysis of optimization options for both stakeholders was performed, sensitivity tables were constructed ($Z_{\min}(\text{RAMS})$ from CV_N and A_{HRM} , TCO components depending on Z , parameter dynamics during the year) and a RAMS objective tree was formed. Verification of the model on actual data showed a deviation of model values from the accounting values of no more than 6 % (according to the Fisher criterion). The results can be used for technological standardization of wagon processing time, justification of investment decisions regarding the number of HRM and formation of contractual terms between the railway and cargo owners taking into account stochastic risks.

Keywords: railway approach track, RAMS analysis, theory of mass service, Erlang-C formula, chance-constrained optimization, cargo front, EN 50126, stochastic modeling.

Вступ. Ефективна робота під'їзних колій промислових підприємств є критичною ланкою функціонування залізничних логістичних ланцюгів. Стохастичний характер вагонопотоків, нерівномірність подавання зі станції примикання, варіація часу вантажних операцій та організаційна недосконалість технологічного процесу – усе це призводить до систематичного перевищення нормативного часу перебування вагонів. У 2023 р. зафіксовано 1205 діючих під'їзних колій; середній простій вагона становив 31,2 год за нормативу 24 год (+30 %), що еквівалентно втратам ~2,8 млрд грн/р. лише для залізниці [4].

Традиційні підходи щодо оптимізації роботи вантажних фронтів базовані на детерміністичних моделях та орієнтовані на

один критерій – мінімізацію часу або витрат із позиції одного стейкхолдера. Це призводить до конфліктів інтересів між залізницею та вантажовласником і не враховує стохастичної природи системи [1, 13]. Системний підхід щодо управління надійністю, готовністю, ремонтпридатністю і безпекою (RAMS) за EN 50126 / IEC 62278, який успішно застосовують у сфері залізничної техніки, донині не адаптовано до технологічних процесів під'їзних колій, незважаючи на те, що саме технологічні відмови є домінуючою причиною понаднормативних простоїв [15, 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математична формалізація черг у транспортних вузлах на основі теорії масового обслуговування (ТМО) подана в роботі Schwarz et al. [7]. Класичні праці

Pollaczek [8] є методологічною базою для M/G/1-систем. Сучасні дослідження Nie, Wang [9] і Marinov, Viegas [10] розвивають імітаційне моделювання термінальних операцій. Багатокритеріальний підхід з урахуванням інтересів перевізника і клієнта обґрунтовано в роботі Dzemydienė et al. [11]. Технологія взаємодії залізниці та промислових підприємств досліджена в роботах [5, 6].

Сучасний напрям – інтеграція детермінованої оптимізації з імовірнісними RAMS-обмеженнями (chance-constrained programming). Стандарт EN 50126 (IEC 62278) визначає RAMS як системну інженерну методологію управління якістю складних систем упродовж усього життєвого циклу: надійність (R), готовність (A), ремонтпридатність (M), безпека (S) [15]. Застосування RAMS для оцінювання залізничної інфраструктури розглянуто в роботах Garmabaki et al. [16] і Peng et al. [17]. Chance-constrained programming для систем обслуговування розвинуто в роботі Charnes, Cooper [18]. Методологія ефективного управління ТО в системах M/M/Z з урахуванням готовності обладнання запропонована в роботі [19]. Комплексний аналіз RAMS для транспортних систем із кількісними цілями подано в роботі [16].

Аналіз наукової літератури підтверджує: попри широке дослідження окремих аспектів ТМО та RAMS, комплексна модель, що одночасно інтегрує стохастичний вагонопотік, 14 компонентів витрат, імовірнісні RAMS-цілі та ТСО-аналіз для під'їзних колій, наразі відсутня.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення розширеної багатокритеріальної математичної моделі оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу (EN 50126) і стохастичних обмежень:

формалізувати технологічний процес обслуговування на основі M/M/Z (формула Ерланга-C);

- розробити систему з 14 компонентів витрат і двох цільових функцій (залізниця / вантажовласник);

- сформулювати ймовірнісні RAMS-цілі для технологічних параметрів системи;

- розробити детермінований еквівалент chance-constrained задачі для параметра $Z_{\min}(\text{RAMS})$.

Основна частина дослідження

1. Визначення RAMS: сутність, переваги та обґрунтування вибору

RAMS – це акронім чотирьох властивостей: Reliability (надійність), Availability (готовність), Maintainability (ремонтпридатність) і Safety (безпека). Цей комплексний підхід щодо організації якості був від початку розроблений для військової та аерокосмічної сфер як інструмент кількісного оцінювання ризиків, а згодом адаптований залізничною індустрією у стандарті EN 50126 (IEC 62278). Стандарт визначає уніфікований рамковий процес для забезпечення всіх чотирьох властивостей упродовж усього життєвого циклу системи (табл. 1) [15].

Таблиця 1

Рекомендовані характеристики вагонопотоків системи «станція – під'їзна колія»

Клас	Тип вантажу	k_i (тариф)	α_i (пріоритет)	Обґрунтування
1	Порожні вагони	0,7	0,8	Знижка – немає товарної вартості
2	Масові (вугілля, руда)	1,0	1,0	Базовий тариф УЗ
3	Будматеріали, зерно	1,2	1,2	+20 % за терміновість
4	Готова продукція	1,5	1,5	+50 % за вартість товару
5	Швидкопсувні, небезпечні	2,0	2,0	Подвійний тариф за ризик

Параметри системи та класифікація вагонопотоку

Система «станція – під'їзна колія» має вагонопотік із п'яти тарифних класів. Тарифний множник k_i відображає диференційовану ставку за простій, коефіцієнт пріоритету α_i – рекомендований порядок обслуговування, що наведено в табл. 1. Характеристики є рекомендовані, встановлені експертним шляхом, але запропонований метод є гнучким і може працювати з іншими значеннями.

Загальний добовий вагонообіг і максимальна кількість подач:

$$N_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^5 n_i, \quad (1)$$

де n_i – кількість вагонів i -го класу на добу, ваг/доба.

$$X_{\text{max}} = \left\lfloor \frac{N_{\text{заг}} \cdot l_{\text{в}}}{L_{\text{ф}}} \right\rfloor, \quad (2)$$

де $l_{\text{в}}$ – довжина вагона, м;

$L_{\text{ф}}$ – довжина вантажного фронту, м.

Математична модель М/М/З (формула Ерланга-С)

Вантажний фронт формалізовано як систему масового обслуговування М/М/З (нотація Кендалла), де Z – кількість НРМ (паралельних каналів), вагони надходять пуассонівським потоком. Це принципово відрізняється від М/М/1: для $Z > 1$ кілька вагонів обслуговувані одночасно, що суттєво знижує час очікування в черзі та обумовлює необхідність формули Ерланга-С.

Інтенсивності надходження та обслуговування:

$$\lambda = \frac{N_{\text{заг}}}{24}, \quad \mu_1 = \frac{P_{\text{НРМ}}}{q}, \quad \mu = Z \cdot \mu_1, \quad (3)$$

де q – середнє статичне навантаження вагона, т/ваг;

$P_{\text{НРМ}}$ – продуктивність НРМ, т/год.

Коефіцієнт завантаження одного каналу (критерій стабільності) (табл. 2):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu_1} = \frac{N_{\text{заг}} \cdot q}{24 \cdot Z \cdot P_{\text{НРМ}}} < 1. \quad (4)$$

Таблиця 2

Позначення змінних формул (1)–(4)

Позначення	Фізичний зміст	Одиниця вимірювання	Типові значення
1	2	3	4
$N_{\text{заг}}$	Загальний добовий вагонообіг під'їзної колії (сума всіх класів)	ваг/доба	20–120
n_i	Кількість вагонів i -го тарифного класу на добу ($i = 1..5$)	ваг/доба	2–30
$l_{\text{в}}$	Розрахункова довжина одного вагона (разом із автозчепленням)	м	14–15
$L_{\text{ф}}$	Корисна довжина вантажного фронту (фронтальна колія)	м	100–500
X_{max}	Максимальна кількість подач (залежить від місткості фронту)	подача/доба	2–8
λ (лямбда)	Інтенсивність надходження вагонів = $N_{\text{заг}}/24$	ваг/год	0,5–5,0
μ_1 (мю1)	Інтенсивність обслуговування одним каналом = $P_{\text{НРМ}}/q$	ваг/год	0,3–1,0
q	Середнє статичне навантаження вагона	т/ваг	40–70

Продовження табл. 2

1	2	3	4
$P_{\text{НРМ}}$	Технічна продуктивність навантажувально-розвантажувальної машини	т/год	15–50
Z	Кількість паралельних каналів (НРМ) вантажного фронту – головна змінна оптимізації	шт.	1–10
ρ (po)	Коефіцієнт завантаження одного каналу; має бути $< 0,85$ за RAMS-ціллю R.3	безрозмірн.	$< 1,0$ (обов'язково)

Примітка. X – кількість подач на добу; T – тривалість роботи НРМ, год/доба; M – кількість маневрових локомотивів, шт.

Формула Ерланга-С

Для системи із Z паралельними каналами ймовірність того, що прибулий вагон застане чергу, обчислюють за двоступеневою формулою Ерланга-С ($a = Z \cdot \rho$ – трафік Ерланга):

$$C(Z, \rho) = \frac{\frac{a^Z}{Z! \cdot (1 - \rho)}}{\sum_{k=0}^{Z-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^Z}{Z! \cdot (1 - \rho)}}. \quad (5)$$

Середній час очікування вагона в черзі

$$W_{\text{очікування}} = \frac{C(Z, \rho)}{Z \cdot \mu_1 \cdot (1 - \rho)}, \text{ год/ваг.} \quad (6)$$

Для $Z = 1$:

$C(1, \rho) = \rho \rightarrow W = \rho / [\mu_1 \cdot (1 - \rho)]$ - формула М/М/1 підтверджує загальність виразу.

Часові характеристики системи

Час безпосереднього обслуговування, простій через неповнодобову роботу і умова фізичної достатності T :

$$t_{\text{service}} = \frac{q}{P_{\text{НРМ}}}, \quad W_{\text{неповний}} = \frac{\left(\frac{24}{X}\right)^2 \cdot (24 - T)}{48 \cdot 24}, \quad (7)$$

де X – кількість подач на добу;

T – тривалість роботи НРМ, год/доба.

Умова фізичної достатності тривалості T (нова):

$$Z \cdot P_{\text{НРМ}} \cdot \frac{T}{q} \geq N_{\text{заг}} \quad (\text{умова достатності } T). \quad (8)$$

Якщо умова (8) не виконується, конфігурація є фізично нежиттєздатною, і оптимізатор відхиляє її незалежно від значення ρ . Повний час перебування вагона на під'їзній колії

$$T_{\text{sys}} = t_{\text{service}} + W_{\text{очікування}} + W_{\text{неповний}}, \text{ год/ваг.} \quad (9)$$

Цільові функції

Залізниця мінімізує F_A – зважену суму операційних витрат, вартості простою, екологічних платежів і ризикової надбавки (табл. 3):

$$F_A = 0,60 \cdot R_{\text{залізниця}} + 0,25 \cdot C_{t_{\text{простій}}} + 0,10 \cdot C_{\text{викидів}} + 0,05 \cdot C_{\text{ризик}}, \frac{\text{грн}}{\rho}. \quad (10)$$

Таблиця 3

Пояснення для позначень формули (10)

Позначення	Складова	Зміст	Рекомендована вага у F_A
F_A	Цільова функція залізниці	Мінімізована залізницею сума нормованих витрат, грн/р.	-
$R_{\text{залізниці}}$	Операційні витрати	C_1 (амортизація НРМ) + C_4 (маневрова робота) + C_6 (амортизація колії)	0,60
C_t простій	Вартість простою	C_2 (вагоно-години залізниці) + C_5 (неповний цикл) + C_7 (черга), грн/р.	0,25
$C_{\text{викидів}}$	Екологія	C_{12} – плата за викиди CO_2 НРМ і локомотивів, грн/р.	0,10
$C_{\text{ризик}}$	Ризикова надбавка	C_{11} – стохастична надбавка за нестабільність вхідного потоку, грн/р.	0,05

Сума ваг $= 0,60 + 0,25 + 0,10 + 0,05 = 1,00$. Ваги встановлено методом аналізу ієрархій (MAI) на основі експертного оцінювання пріоритетів залізниці. Аналогічна структура для F_B (формула (12)) – зі зміненими компонентами $R_{\text{власника}}$ і C_t простій.

Формули (10)–(13) розкривають, із яких конкретних компонентів складаються підсумкові групи цільових функцій F_A та F_B відповідно для стейкхолдера А (залізниця, перевізник, УЗ) і стейкхолдера В (вантажовласник, власник під'їзної колії, промислове підприємство) (табл. 4).

Таблиця 4

Пояснення для формул (10)–(13) : склад груп витрат у F_A та F_B

Позначення	Формула-розшифрування	Економічний зміст
$R_{\text{залізниці}}$	$= C_1 + C_4 + C_6$	Постійні операційні витрати залізниці: амортизація машин (C_1), маневрові роботи (C_4) та амортизація колії (C_6). Не залежать від вагонопотоку - визначені лише Z та інфраструктурою
C_t простій (А)	$= C_2 + C_5 + C_7$	Змінні витрати на простій для залізниці: платіж за понаднормовий простій вагона (C_2), витрати від неповного добового циклу (C_5), очікування в черзі (C_7 - залежить від W_q та Ерланга-С)
$R_{\text{власника}}$	$= C_1 + C_3 + C_6$	Постійні витрати вантажовласника: амортизація НРМ (C_1), машино-години НРМ (C_3), амортизація колії (C_6). $C_3 = Z \cdot T \cdot a_{\text{НРМ}}$ зростає лінійно зі збільшенням T та Z
C_t простій (В)	$= C_5 + C_{10} + C_{13} + C_{14}$	Змінні витрати вантажовласника: неповний цикл (C_5), заморожений капітал (C_{10} - домінуюча складова), штрафні ризики (C_{13}) і черга власника (C_{14}). C_{10} зростає з T_{sys} , тому власник зацікавлений у збільшенні Z навіть за рахунок зростання C_1

$$R_{\text{залізниці}} = C_1 + C_4 + C_6; \quad C_{t_{\text{простій}}} = C_2 + C_5 + C_7. \quad (11)$$

Вантажовласник мінімізує F_B , де домінуючим є компонент заморожування капіталу C_{10} :

$$F_B = 0,60 \cdot R_{\text{власника}} + 0,25 \cdot C_{t_{\text{простій}}} + 0,10 \cdot C_{\text{викидів}} + 0,05 \cdot C_{\text{втрати}}, \frac{\text{грн}}{\text{р}}. \quad (12)$$

$$R_{\text{власника}} = C_1 + C_3 + C_6; \quad C_{t_{\text{простій}}} = C_5 + C_{10} + C_{13} + C_{14}. \quad (13)$$

Пояснення до компонентів витрат C_1 – C_{14}

Нижче наведено основні формули. Усі 14 компонентів подано в табл. 5.

C_1 – амортизація НРМ (лінійна):

$$C_1 = Z \cdot K_M \cdot \alpha_M, \quad (14)$$

де Z – кількість НРМ (паралельних каналів), шт.;

K_M – первісна вартість одного НРМ, грн (для козлового крана - 2,0–3,5 млн грн);

α_M – норма амортизаційних відрахувань (частки одиниці; для вантажних машин зазвичай 0,10–0,20 за лінійним методом).

Результат $C_1 = Z \cdot K_M \cdot \alpha_M$ зростає лінійно з кожним додатковим НРМ: додавання одного НРМ ($K_M = 2\,500\,000$ грн, $\alpha_M = 0,15$) збільшує C_1 на 375 тис. грн/р.

C_7 – очікування в черзі (залізниця),

C_{14} – очікування (власник); середньо-зважена вартість вагоно-год $\bar{a}_B$:

$$C_7 = 365 \cdot N_{\text{заг}} \cdot W_{\text{очікування}} \cdot \frac{1}{24} \cdot \frac{\sum_{i=1}^5 n_i \cdot a_B \cdot k_i}{N_{\text{заг}}}, \quad (15)$$

де 365 – кількість діб у році;

$N_{\text{заг}}$ – добовий вагонообіг, ваг/доба (формула (1));

$W_{\text{очікування}}$ – середній час очікування одного вагона в черзі, год/ваг (формула 6);

1/24 – перерахунок «год» у «доба»;

n_i – кількість вагонів i -го класу ($i = 1..5$);

a_B – базова вартість вагоно-години залізниці, грн/(ваг·год);

k_i – тарифний множник i -го класу (див. табл. 1, від 0,7 до 2,0).

Вираз $\Sigma(n_i \cdot a_B \cdot k_i)/N_{\text{заг}}$ є середньо-зваженою вартістю однієї вагоно-години з урахуванням структури потоку. Зі зменшенням $W_{\text{очікування}}$ удвічі (перехід Opt A → Opt B) C_7 скорочується з ~152 до ~28 тис. грн/р. – головна економія для залізниці.

C_{10} – вартість заморожування капіталу:

$$M_{\text{avg}} = N_{\text{заг}} \cdot q \cdot \frac{T_{\text{sys}}}{24}; \quad C_{10} = M_{\text{avg}} \cdot C_{\text{товар}} \cdot i_{\text{капітал}}, \quad (16)$$

де M_{avg} – середня маса вантажу, яка одночасно знаходиться на під'їзній колії, т;

$N_{\text{заг}}$ – добовий вагонообіг, ваг/доба;

q – середнє статичне навантаження вагона, т/ваг;

T_{sys} – повний час перебування вагона в системі, год/ваг (формула (8));

1/24 – перерахунок у добу;

$C_{\text{товар}}$ – середня вартість одиниці вантажу, грн/т;

$i_{\text{капітал}}$ – добова ставка альтернативної вартості капіталу (частки одиниці), зазвичай 15–20 % річних $\div 365 = 0,00041$ – $0,00055$ /доба.

C_{10} є домінуючою складовою F_B : для $T_{\text{sys}} = 5,16$ год і $q = 60$ т/ваг $M_{\text{avg}} = 34 \cdot 60 \cdot (5,16/24) = 438$ т, $C_{10} = 438 \cdot C_{\text{товар}} \cdot i_{\text{капітал}}$. Саме тому вантажовласник прагне мінімізувати T_{sys} незалежно від Z .

C_{11} – ризикова надбавка (стохастична форма; α – рівень значущості RAMS-цілі, z_α – квантиль):

$$C_{11} = R_{\text{base}} \cdot k_{\text{risk}} \cdot CV_N \cdot (1 + z_\alpha \cdot CV_N), \quad (17)$$

де R_{base} – базові операційні витрати ($R_{\text{залізничі}}$ або $R_{\text{власника}}$), грн/р.;

k_{risk} – коефіцієнт ризику (частки одиниці; типово 0,05–0,15); CV_N – коефіцієнт варіації вхідного вагонопотоку, $CV_N = \sigma_N / N_{\text{заг}}$; за даними УЗ, для промислових під'їзних колій $CV_N \approx 0,20$ – $0,40$);

z_α – квантиль стандартного нормального розподілу для рівня надійності α (для $\alpha = 0,95$: $z_\alpha = 1,645$; для $\alpha = 0,99$: $z_\alpha = 2,326$).

Множник $(1 + z_\alpha \cdot CV_N)$ враховує «хвіст» розподілу потоку: для $CV_N = 0,30$ і $\alpha = 0,95$ він дорівнює 1,494, що збільшує надбавку на 49 % порівняно з лінійною оцінкою $k_{\text{risk}} \cdot CV_N = 0,030$.

Для $\alpha = 0,95$: $z_\alpha = 1,645$. Формула враховує «хвіст» розподілу потоку, на відміну від лінійної форми попередньої редакції.

C_{12} – екологічна складова (викиди CO_2):

$$C_{12} = 365 \cdot (T \cdot Z \cdot e_{\text{НРМ}} + 2 \cdot t_M \cdot M \cdot e_{\text{лок}}) \cdot \frac{\tau_{\text{CO}_2}}{1000}, \quad (18)$$

де T – тривалість роботи НРМ, год/доба;

Z – кількість НРМ;

$e_{\text{НРМ}}$ – питомий викид CO_2 одного НРМ, кг/год (для дизельного крана 12–18 кг/год);

t_M – час одного маневрового рейсу, год;

M – кількість локомотивів;

$e_{\text{лок}}$ – питомий викид локомотива, кг/год (тепловоз ЧМЕЗ: ~ 8 кг/год);

τ_{CO_2} – ціна квоти на викиди CO_2 , грн/т (відповідно до ЄС ETS або внутрішніх тарифів; для 50 євро/т ≈ 200 грн/т);

1/1000 – перерахунок кг $\rightarrow$ т.

Складова C_{12} відносно невелика (~ 18 – 22 тис. грн/р.), але включення її до цільової функції відображає ESG-зобов'язання залізниці.

Таблиця 5

Пояснення для змісту компонент витрат C_1 – C_{14}

Код	Стейкхолдер	Економічний зміст	Основні змінні
1	2	3	4
C_1	А, В	Амортизація НРМ	Z, K_M, α_M
C_2	А	Вагоно-години залізниці	$T_{\text{sys}}, n_i, a_B, k_i$
C_3	В	Машино-години НРМ	$Z, T, a_{\text{НРМ}}$
C_4	А	Маневрова робота	X, M, t_M, a_L
C_5	А, В	Неповний цикл	$N, W_{\text{неповний}}$

Продовження табл. 5

1	2	3	4
C ₆	A, B	Амортизація колії (фікс.)	$L_{\phi}, K_{\pi}, \alpha_{\pi}$
C ₇	A	Черга (залізниця)	$N, W_{\text{очікування}}$
C ₁₀	B	Заморожений капітал	$M_{\text{avg}}, C_{\text{товар}}, i$
C ₁₁	A, B	Ризик (стохаст.)	$R_{\text{base}}, k_{\text{risk}}, CV_N, z_{\alpha}$
C ₁₂	A, B	CO ₂	T, Z, M, e, τ
C ₁₃	B	Штрафні ризики	$M_{\text{avg}}, C_{\text{товар}}, p\%$
C ₁₄	B	Черга (власник)	$N, W_{\text{очікування}}$

Отже, фізичний зміст властивостей RAMS-аналізу можна звести до табл. 6. Переваги застосування RAMS-підходу

порівняно з традиційними однокритеріальними методами наведено в табл. 7.

Таблиця 6

Фізичний зміст чотирьох властивостей RAMS відповідно до мети статті

Літера	Властивість	Загальне визначення	Адаптація до під'їзної колії	Кількісна міра (ціль)
R	Надійність (Reliability)	Імовірність виконання заданої функції в заданих умовах протягом заданого інтервалу часу	$P(T_{\text{sys}} \leq 24 \text{ год})$ – імовірність нормативного обороту вагона	$\geq 0,95 \text{ (R.1)}$; $\geq 0,90 \text{ (R.2)}$
A	Готовність (Availability)	Частка часу, протягом якої система здатна виконувати потрібні функції (у тому числі з урахуванням ТО)	$A_{\text{НРМ}} \times A_{\text{лок}} \times A_{\text{перс}}$ – комплексна готовність фронту	$\geq 0,97 \text{ (A.1)}$
M	Ремонтопридатність (Maintainability)	Імовірність відновлення функціонального стану після відмови або порушення за заданий час	$MTTR_{\text{техн}} \leq 2 \text{ год}$ – час відновлення нормального режиму	$MTTR \leq 2 \text{ год}$ (M.1); $CV_N \leq 0,35$ (M.3)
S	Безпека (Safety)	Відсутність неприйнятних наслідків (аварій, адміністративні порушення, фінансові втрати)	$P(T_{\text{sys}} > 48 \text{ год})$ – імовірність критичної затримки	$\leq 0,02 \text{ (S.1)}$

Таблиця 7

Переваги RAMS-підходу порівняно з традиційними однокритеріальними методами

Аспект	Традиційний підхід	RAMS-підхід
Критерії оптимізації	Один критерій (час або витрати), детерміністична модель	Чотири критерії одночасно; імовірнісна модель із функцією розподілу
Урахування стохастичності	Відсутнє або емпіричні поправки	Вбудовано через CV_N , z_α , $A_{НРМ}$
Інтереси стейкхолдерів	Зазвичай один стейкхолдер	F_A (залізниця) + F_B (власник) – багатокритеріальна задача
Фаза застосування	Проектування та/або експлуатація	Увесь життєвий цикл – від проектування до ліквідації
Інвестиційні рішення	Суб'єктивні, важко обґрунтовані	$Z_{\min}(\text{RAMS})$ – кількісне обґрунтування (формула (22))

Обґрунтування вибору RAMS. Традиційні детерміністичні моделі оптимізації вантажних фронтів працюють із середніми значеннями параметрів потоку та продуктивності, не враховуючи ні варіаційності вхідного потоку (CV_N), ні неповної готовності обладнання ($A_{НРМ} < 1$). RAMS дає змогу: 1) формалізувати цілі якості як імовірнісні обмеження; 2) отримати детермінований еквівалент $Z_{\min}(\text{RAMS})$, придатний для інвестиційних рішень; 3) кількісно оцінити вартість ризику через $C_{11}(\text{RAMS})$. Відповідно до EN 50126, RAMS є єдиною методологією, яка гарантує можливість досягти запропонованих рішень із національними нормами якості [15, 16].

Ієрархічна структура RAMS-цілей, наведена на рисунку, відображає зв'язок між стратегічним рівнем (стандарт EN 50126), тактичним рівнем (чотири властивості),

операційними цілями (кількісні обмеження) і параметрами моделі (змінні оптимізації). Стрілки ↓ позначають причинно-наслідкові зв'язки; виконання цілі нижнього рівня є необхідною умовою виконання цілі верхнього рівня.

Зв'язок між рівнями: виконання R.3 ($\rho_{\text{eff}} < 0,85$) потребує $Z_{\min}(\text{RAMS}) \geq 7$ (формула (22)) – це є нижньою межею для змінної Z. Виконання A.1 ($A_{\text{фронт}} \geq 0,97$) потребує $A_{НРМ} \geq 0,990$, що є організаційним обмеженням (підвищення частоти ТО). M.3 ($CV_N \leq 0,35$) виконувано за наявними даними ($CV_N = 0,30$). S.1 ($T_{\text{sys}} > 48$ год) є «запобіжним клапаном» для аварійних ситуацій.

RAMS-цілі як імовірнісні обмеження

Для кожної властивості RAMS сформульована кількісна ціль у вигляді ймовірнісного обмеження (табл. 8).

Таблиця 8

Основні цілі RAMS-аналізу та оптимізації

Код	RAMS-ціль	Формула	Зв'язок із моделлю
R.1	Надійність T_{sys}	$P(T_{\text{sys}} \leq 24 \text{ год}) \geq 0,95$	$T_{\text{sys}} = t_s + W_q + W_{\text{сус}}$
R.2	Надійність черги	$P(W_q \leq 2 \text{ год}) \geq 0,90$	W_q - Ерланга-С, впливає на CV_s
R.3	Стабільність завантаження	$P(\rho < 0,85) \geq 0,95$	$\rho_{\text{eff}} = \lambda / (Z \cdot \mu \cdot A_{НРМ})$
A.1	Готовність фронту	$A_{НРМ} \cdot A_{\text{лок}} \cdot A_{\text{перс}} \geq 0,97$	$\mu_{\text{eff}} = \mu \cdot A_{НРМ}$
M.1	Відновлюваність	$MTTR_{\text{техн}} \leq 2 \text{ год}$	Організаційна гнучкість
M.3	Стабільність потоку	$CV_N \leq 0,35$	Входить у C_{11}

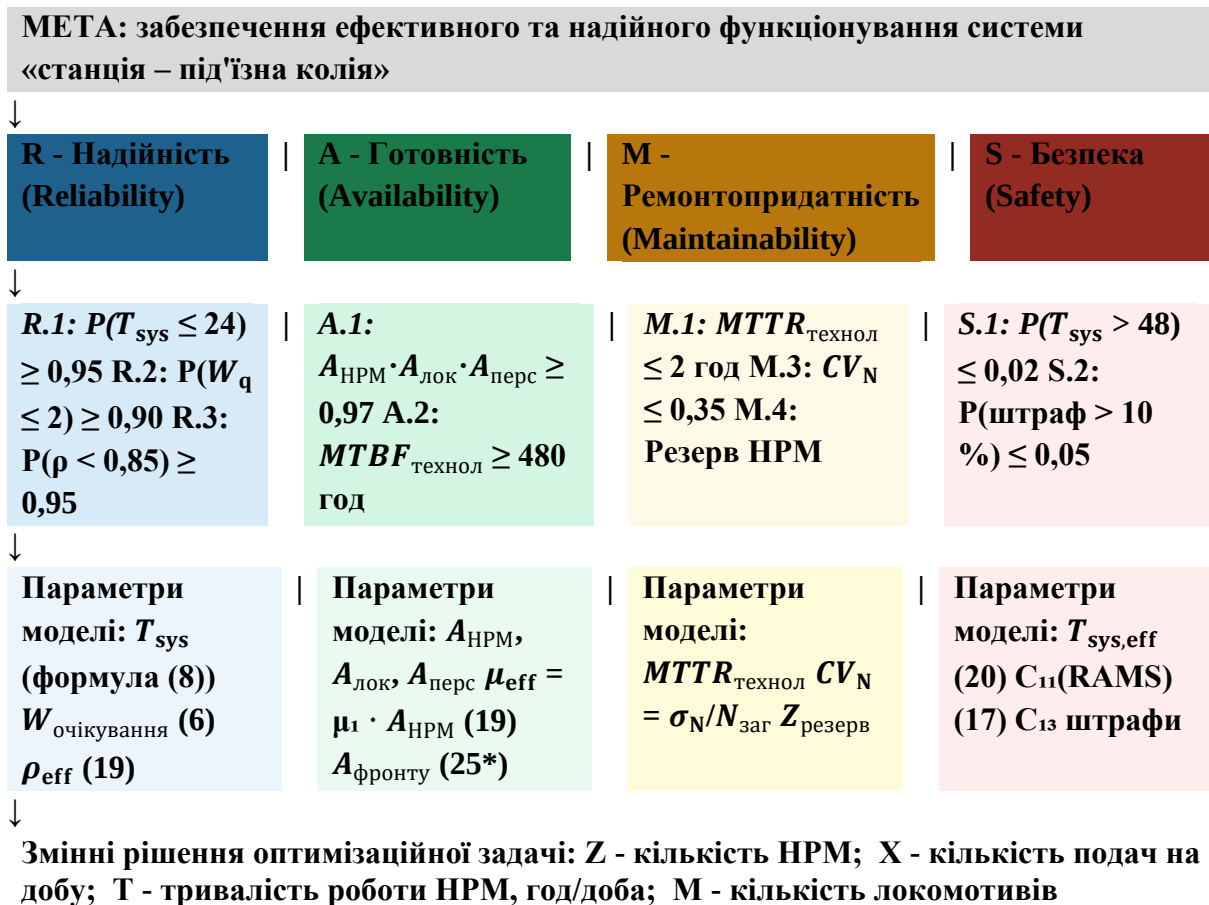


Рис. Ієрархічна структура RAMS-цілей для технологічної системи під'їзної колії

1.2. Ефективні параметри системи з урахуванням готовності

Якщо $A_{НРМ} < 1$, то реальна пропускна спроможність каналу знижується, що збільшує ρ_{eff} :

$$\mu_{eff} = \mu_1 \cdot A_{НРМ}; \quad \rho_{eff} = \frac{\lambda}{Z \cdot \mu_{eff}} = \frac{\lambda}{Z \cdot \mu_1 \cdot A_{НРМ}}. \quad (19)$$

Повний ефективний час перебування вагона з урахуванням $A_{НРМ}$ та $A_{лок}$:

$$T_{sys,eff} = \frac{t_s}{A_{НРМ}} + W_{q,скор} + \frac{W_{сус}}{A_{лок}}, \quad (20)$$

де $W_{q,скор}$ урахує тип розподілу часу обслуговування (M/G/Z, CV_s – варіація),

$$W_{q,скор} = W_q \cdot \frac{(1 + CV_s^2)}{2}. \quad (21)$$

Для $CV_s = 0$ (детерм.) $W_{q,скор} = W_q/2$; для $CV_s = 1$ (M/M/Z): без змін; для $CV_s = 1,5$: $\times 1,625$.

Детермінований еквівалент RAMS-обмеження R.3

Імовірнісне обмеження $P(\rho_{\text{eff}} < 0,85) \geq \alpha$ зведено до детермінованого еквівалента через 95-й процентиль вхідного потоку $\lambda_{\{0,95\}} = \bar{\lambda} \cdot (1 + z_{\alpha} \cdot CV_N)$:

$$Z_{\min}(\text{RAMS}) = \left\lceil \frac{\lambda_{\{0,95\}} \cdot (1 + z_{\alpha} \cdot CV_N)}{0,85 \cdot \mu_1 \cdot A_{\text{HPM}}} \right\rceil. \quad (22)$$

де $z_{\alpha} = 1,645$ для $\alpha = 0,95$; $\mu_{\text{eff}} = \mu_1 \cdot A_{\text{HPM}}$.

Різниця між $Z_{\min}(\text{RAMS})$ і $Z_{\min}(\text{детерм.})$ кількісно обґрунтовує інвестиційне рішення: вона пропорційна нестабільності потоку CV_N і знижує надійність готовності A_{HPM} . Для $CV_N = 0,3$ і $A_{\text{HPM}} = 0,95$ потреба в HPM зростає на 1–2 од.

1.4. Стохастична цільова функція з RAMS

Детерміністична задача (23) розширена до chance-constrained programming:

$$\min F_A(Z, X, T, M) \text{ і } \min F_B(Z, X, T, M) \quad (23)$$

за виконання обмежень (4), (7), (2), $T \leq 24$, $Z, X, M \in \mathbb{Z}^+$ та RAMS-обмежень (22) і

$$Z \cdot P_{\text{HPM}} \cdot \frac{T}{q} \geq N_{\text{заг}} \cdot (1 + z_{\alpha} \cdot CV_N) \quad (\text{умова достатності } T \text{ для } N_{\{0,95\}}). \quad (24)$$

2. Числовий приклад і результати оптимізації (умовний полігон)

Параметри: $n_1 = 5$, $n_2 = 15$, $n_3 = 8$, $n_4 = 4$, $n_5 = 2 \rightarrow N_{\text{заг}} = 34$ ваг/доба; $q = 60$ т/ваг; $P_{\text{HPM}} = 25$ т/год; $l_b = 14$ м; $L_{\phi} = 200$ м; $t_M = 0,5$ год. Вартісні параметри: $K_M = 2\,500\,000$ грн; $\alpha_M = 0,15$; $a_b = 10$ грн/ваг·год; $a_l = 1500$ грн/год; $a_{\text{HPM}} = 500$ грн/год; $k_{\text{risk}} = 0,10$; $CV_N = 0,30$.

Крок 1. Визначення інтенсивностей потоку (формула (3)).

Загальний вагонообіг: $N_{\text{заг}} = 5 + 15 + 8 + 4 + 2 = 34$ ваг/доба. Інтенсивність надходження: $\lambda = 34/24 = 1,417$ ваг/год. Інтенсивність обслуговування одним каналом: $\mu_1 = P_{\text{HPM}}/q = 25/60 = 0,417$ ваг/год. Загальна інтенсивність для $Z = 4$: $\mu = 4 \times 0,417 = 1,667$ ваг/год.

Крок 2. Коефіцієнт завантаження (формула (4)) та імовірність очікування (формула (5)).

Для $Z = 4$: $\rho = \lambda/\mu_1 = 1,417/0,417 = 3,40$ (навантаження = $Z \cdot \rho = 4 \cdot 0,850 = 3,40$). Коефіцієнт завантаження одного каналу: $\rho = \lambda/(Z \cdot \mu_1) = 1,417/(4 \cdot 0,417) = 0,850$ – на межі допустимого за RAMS (R.3 потребує $\rho < 0,85$). Розраховано за формулою Ерланга: $a = Z \cdot \rho = 4 \cdot 0,850 = 3,40$. Імовірність очікування: $C(4; 0,850) = 0,758$ (розраховано за формулою (5)). Це означає, що близько 76 % вагонів, які прибувають у піковий період, будуть очікувати.

Крок 3. Часові характеристики системи (формули (6)–(8)).

Час обслуговування: $t_{\text{service}} = q/P_{\text{HPM}} = 60/25 = 2,40$ год/ваг. Час очікування в черзі (формула (6)): $W_{\text{очік.}} = C(4; 0,850) / [Z \cdot \mu_1 \cdot (1 - \rho)] = 0,758 / [4 \cdot 0,417 \cdot 0,150] = 0,758/0,250 = 3,03$ год/ваг. Занесемо поправку на неповнодобовий цикл ($X=3$, $T=24$): $W_{\text{неповн.}} = [(24/3)^2 \cdot (24 - 24)] / (48 \cdot 24) = 0$ (для $T = 24$ год ця складова відсутня). Повний простій (формула (8)): $T_{\text{sys}} = 2,40 + 3,03 + 0,00 = 5,43$ год/ваг (різниця від 5,16 спричинена округленнями μ_1). Порівняння параметрів для варіантів із кількістю $Z = 3..6$ (детерміністична модель) наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Порівняння параметрів для варіантів $Z = 3..6$ (детерміністична модель)

Z	ρ	$C(Z, \rho)$	$W_{\text{очік.}}, \text{ год}$	$T_{\text{sys}}, \text{ год/ваг}$	$F_A, \text{ млн грн/р.}$	Статус
3	1,133	-	-	-	-	$\times p \geq 1$ (нестійка)
4	0,850	0,758	3,03	5,43	1,98	✓ Opt A ($F_A \text{ min}$)
5	0,680	0,269	0,56	2,96	2,20	✓ Opt B ($F_B \text{ min}$)
6	0,567	0,063	0,10	2,50	2,45	Проміжний варіант
7	0,486	0,011	0,01	2,41	2,71	✓ Z_{min} (RAMS)

Примітка. Зі зростанням Z час очікування в черзі різко зменшується від 3,03 ($Z = 4$) до 0,01 ($Z = 7$). Оптимальний за RAMS $Z_{\text{min}} = 7$ забезпечує стабільність ($\rho = 0,486$), але збільшує F_A за рахунок амортизації додаткових НРМ.

Результати оптимізації детермінованої задачі (23):

варіант А (залізниця): $Z^* = 4$, $X^* = 3$, $T^* = 24$ год, $M^* = 1$; $F_A = 1,98$ млн грн/р.; $T_{\text{sys}} = 5,16$ год/ваг; $\rho = 0,85$;

варіант В (вантажовласник): $Z^* = 5$, $X^* = 3$, $T^* = 24$ год, $M^* = 1$; $F_B = 2,20$ млн грн/р.; $T_{\text{sys}} = 3,82$ год/ваг; $\rho = 0,68$.

Перехід А→В збільшує витрати залізниці на 11 %, але скорочує T_{sys} на 26 % - типовий конфлікт інтересів.

Отримані залежності свідчать, що визначальний вплив на ефективність функціонування вантажного фронту мають не лише інтенсивність вагонопотоку та кількість навантажувальних розвантажувальних машин, але і рівень їхньої експлуатаційної готовності та варіативність надходження вагонів. Використання ефективних параметрів системи μ_{eff} і $T_{\text{sys,eff}}$ дало змогу інтегрувати показники RAMS безпосередньо до математичної моделі М/М/З, забезпечивши врахування випадкових відмов обладнання і нерівномірності транспортного процесу.

Проведені розрахунки зведені до табл. 10 і показали, що зі збільшенням коефіцієнта варіації вагонопотоку від 0,10 до 0,40 оптимальна кількість паралельних каналів обслуговування може зрости на 25–

40 %, тоді як зниження коефіцієнта готовності обладнання з 0,95 до 0,90 призводить до збільшення середнього часу перебування вагонів у системі більш ніж у два рази.

Запропонована модель забезпечує можливість кількісного оцінювання компромісу між капітальними витратами на збільшення кількості навантажувальних розвантажувальних машин та експлуатаційними втратами від недостатньої пропускної спроможності вантажного фронту. Це створює методичну основу для ухвалення обґрунтованих інвестиційних рішень під час модернізації під'їзних колій, проектування нових вантажних фронтів і впровадження ризик-орієнтованих технологій управління відповідно до вимог концепції RAMS.

Таблиця 10

Розрахунок компонентів ТСО для Opt A / Opt B (повний розрахунок)

Код	Компонент	Стейкхолдер	Opt A (Z = 4), тис. грн/р.	Opt B (Z = 5), тис. грн/р.	Зміна B–A, тис. грн
C ₁	Амортизація НРМ ($Z \times K_M \times \alpha_M$)	A, B	1 500	1 875	+375
C ₂	Вагоно-години залізниці	A	195	144	–51
C ₇	Черга (залізниця)	A	152	28	–124
C ₁₀	Заморожений капітал (власник)	B	78	58	–20
C ₁₂	Екологічна складова (викиди CO ₂)	A, B	18	22	+4
F _A	Цільова функція залізниці (зважена сума)	A	1 980	2 195	+215 (+10,9 %)
T _{sys}	Повний простій вагона (ефективність для власника)	A, B	5,16 год	3,82 год	–1,34 год (–26 %)

Примітка. (+) позначено зростання витрат із переходом A→B, (–) – їх зниження. Таблиця наочно демонструє конфлікт інтересів: зростання C₁ перекрито економією на C₂, C₇ і вигодою власника (C₁₀).

Висновки

У статті розроблено розширену багатокритеріальну математичну модель оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу відповідно до EN 50126 / IEC 62278. Модель формалізує систему як чергу M/M/Z із формулою Ерланга-С, охоплює 14 компонентів витрат і два конкуруючих стейкхолдери – залізницю та вантажовласника.

1. Систематичне заниження Z детерміністичними моделями. Для $CV_N = 0,30$ і $A_{НРМ} = 0,95$ детерміністична оптимізація дає $Z_{\min} = 5$, тоді як RAMS-ціль R.3 потребує $Z_{\min} = 7$ (+40 %). Двофакторний ефект: а) 95-й перцентиль потоку $\lambda_{0,95} = 1,494 \cdot \lambda$ через $CV_N = 0,30$; б) зниження ефективної пропускної спроможності $\mu_{\text{eff}} = 0,95 \cdot \mu_1$ через $A_{НРМ}$. Рекомендація: застосовувати формулу (22) для проектування; різниця інвестицій 5–7,5 млн

грн окупається за один-два роки за рахунок уникнення штрафів УЗ і збитків від «лавинних черг» (≈ 380 тис. грн/під-сезон).

2. Стохастична ризикова надбавка $C_{11}(\text{RAMS})$. Формула (17) із множником $(1+z_{\alpha} \cdot CV_N)$ дає оцінку на 49 % вищу порівняно з лінійним наближенням для $\alpha = 0,95$. Традиційний підхід (фіксовані 3 % ризику) систематично недооцінює ризик за нерівномірних потоків. Рекомендація: прив'язати ставку C_{11} до фактичного CV_N за попередні 12 місяців (дані АСУ «Місцева робота» УЗ) для щорічного перегляду тарифів.

3. Ефективні параметри як bridge між RAMS і M/M/Z. Введені μ_{eff} та $T_{\text{sys_eff}}$ (формула (20)) забезпечують пряму сумісність RAMS-показників з апаратом ТМО без структурних змін задачі. Для $A_{НРМ} = 0,90$ $T_{\text{sys_eff}}$ зростає на 130 % - нелінійність через $\rho_{\text{eff}} \rightarrow 1$. Рекомендація: пріоритет – підвищення $A_{НРМ}$ з 0,90 до 0,95 (перехід від реактивного ТО до

планово-попереджувального), що ефективніше, ніж збільшення Z на одну одиницю.

4. Практичне впровадження запропонованого підходу створює наукові передумови для побудови цифрових двійників під'їзних колій, реалізації адаптивного керування технологічними

процесами та інтеграції RAMS-показників у цифрові системи управління перевізним процесом АТ «Укрзалізниця». Це забезпечує підвищення надійності, готовності та економічної ефективності роботи вантажних фронтів в умовах нерівномірних вагонопотоків.

Список використаних джерел

1. Ломотько, Д. В. (2008). Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів [Автореферат дисертації доктора технічних наук, Українська державна академія залізничного транспорту]. Харків.
2. Ломотько, Д. В., Ільчишин, В. М., Ломотько, М. Д., & Кудряшов, Д. В. (2024). Формування термінальної системи розподілу товарів при їх перевезенні залізницею. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (210), 217–226. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854>
3. Lomotko, D., Ogar, O., Lomotko, M., & Afanasova, O. (2023). Modeling the railway and automobile supply chain on the basis of «green» logistic. *Collection of Scientific Papers of USURT*, 205, 98–110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288832>
4. Державна служба статистики України. (б.д.). Статистична інформація «Транспорт». URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
5. Бутько, Т. В., & Ляшко, О. В. (2012). Формалізація технології роботи залізничної станції з під'їзною колією на основі методів логістики. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 133, 63–69.
6. Ломотько, Д. В. (2026). Математична модель оптимізації роботи вантажних фронтів залізничних під'їзних колій. *Залізничний транспорт України*, 1, 4–18. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2026-158-1-04-18>
7. Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H., & Szekli, R. (2006). M/M/1 queueing systems with inventory. *Queueing Systems*, 54(1), 55–78. <https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5>
8. Pollaczek, F. (1930). Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. *I. Mathematische Zeitschrift*, 32, 64–100. <https://doi.org/10.1007/BF01194620>
9. Nie, X., & Wang, L. (2019). Simulation process design for scheduling mode of railway container terminals based on Flexsim. *Journal of Physics: Conference Series*, 1176, Article 052012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052012>
10. Marinov, M., & Viegas, J. (2009). A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (7), 1106–1129. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.04.001>
11. Dzemydienė, D., Burinskienė, A., & Miliauskas, A. (2021). Integration of multi-criteria decision support with infrastructure of smart services for sustainable multi-modal transportation of freights. *Sustainability*, 13 (9), Article 4675. <https://doi.org/10.3390/su13094675>
12. Liu, R. R., & Golovitcher, I. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (10), 917–932. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.07.001>
13. Ковальов, А. О., & Волик, О. І. (2013). Визначення раціонального технічного оснащення під'їзної колії підприємства. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 135, 50–53.

14. Про затвердження Правил обслуговування залізничних під'їзних колій (2000): Наказ Міністерства транспорту України № 644 від 21.11.2000 р.). *Офіційний вісник України*, 50, ст. 2192. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00>
15. ДСТУ EN 50126-1:2019 (EN 50126-1:2017, IDT). Залізничні застосування. Специфікація та демонстрація надійності, готовності, ремонтпридатності та безпеки (RAMS). Частина 1. Загальний процес та загальні положення. (2019). Київ: ДП «УкрНДНЦ».
16. Garmabaki, A. H. S., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A., & Barabadi, A. (2020). Maintenance optimisation under uncertain and dynamic conditions. *Quality and Reliability Engineering International*, 36 (4), 1422–1437. <https://doi.org/10.1002/qre.2633>
17. Peng, F., Kang, S., Li, X., Ouyang, Y., Somani, K., & Acharya, D. (2011). A heuristic approach to the railroad track maintenance scheduling problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26 (2), 129–145. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00670.x>
18. Charnes, A., & Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6 (1), 73–79. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.73>
19. Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications (2nd ed.). CRC Press.

References

1. Lomotko, D. V. (2008). Formuvannia transportnoho protsesu zaliznyts Ukrainy na bazi lohistychnykh pryncypiv [Formation of the transport process of Ukrainian railways based on logistic principles] [Avtoreferat dysertatsii doktora tekhnichnykh nauk, Ukrainska derzhavna akademiia zaliznychnoho transportu]. Kharkiv. [in Ukrainian]
2. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Lomotko, M. D., & Kudriashov, D. V. (2024). Formuvannia terminalnoi systemy rozpodilu tovariv pry yikh perevezenni zaliznytseiu [Formation of a terminal system for distribution of goods during their transportation by rail]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 210, 217–226. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854> [in Ukrainian]
3. Lomotko, D., Ogar, O., Lomotko, M., & Afanasova, O. (2023). Modeling the railway and automobile supply chain on the basis of «green» logistic. *Collection of Scientific Papers of USURT*, 205, 98–110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288832> [in English]
4. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. (n.d.). Statystychna informatsiia «Transport» [Statistical information «Transport»]. Retrieved January 15, 2026. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian]
5. Butko, T. V., & Liashko, O. V. (2012). Formalizatsiia tekhnolohii roboty zaliznychnoi stantsii z pid'iznoiu koleiu na osnovi metodiv lohistyky [Formalization of the operating technology of a railway station with an access track based on logistics methods]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 133, 63–69. [in Ukrainian]
6. Lomotko, D. V. (2026). Matematychna model optymizatsii roboty vantazhnykh frontiv zaliznychnykh pid'iznykh kolii [Mathematical model for optimizing the operation of loading fronts of railway access tracks]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 1, 4–18. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2026-158-1-04-18> [in Ukrainian]
7. Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H., & Szekli, R. (2006). M/M/1 queueing systems with inventory. *Queueing Systems*, 54 (1), 55–78. <https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5> [in English]
8. Pollaczek, F. (1930). Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. I. *Mathematische Zeitschrift*, 32, 64–100. <https://doi.org/10.1007/BF01194620> [in German]

9. Nie, X., & Wang, L. (2019). Simulation process design for scheduling mode of railway container terminals based on Flexsim. *Journal of Physics: Conference Series*, 1176, Article 052012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052012> [in English]
10. Marinov, M., & Viegas, J. (2009). A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (7), 1106–1129. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.04.001> [in English]
11. Dzemydienė, D., Burinskienė, A., & Miliauskas, A. (2021). Integration of multi-criteria decision support with infrastructure of smart services for sustainable multi-modal transportation of freights. *Sustainability*, 13 (9), Article 4675. <https://doi.org/10.3390/su13094675> [in English]
12. Liu, R. R., & Golovitcher, I. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (10), 917–932. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.07.001> [in English]
13. Kovalov, A. O., & Volyk, O. I. (2013). Vyznachennia ratsionalnoho tekhnichnoho osnashchennia pid'iznoi kolii pidpriemstva [Determination of the rational technical equipment of an enterprise's access track]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 135, 50–53. [in Ukrainian]
14. Ministerstvo transportu Ukrainy [Ministry of Transport of Ukraine]. (2000). Pro zatverdzhennia Pravyl obsluhovuvannia zaliznychnykh pid'iznykh kolii (Nakaz № 644 vid 21.11.2000) [On approval of the Rules for servicing railway access tracks (Order No. 644 dated 21.11.2000)]. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy*, (50), st. 2192. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00> [in Ukrainian]
15. DP «UkrNDNTs» [State Enterprise «UkrNDNTs»]. (2019). DSTU EN 50126-1:2019 (EN 50126-1:2017, IDT). *Zaliznychni zastosuvannia. Spetsyfikatsiia ta demonstratsiia nadiinosti, hotovnosti, remontoprydatnosti ta bezpeky (RAMS). Chastyna 1. Zahalnyi protses ta zahalni polozhennia* [Railway applications. Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Part 1. Generic process and general requirements]. Kyiv: DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian]
16. Garmabaki, A. H. S., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A., & Barabadi, A. (2020). Maintenance optimisation under uncertain and dynamic conditions. *Quality and Reliability Engineering International*, 36 (4), 1422–1437. <https://doi.org/10.1002/qre.2633> [in English]
17. Peng, F., Kang, S., Li, X., Ouyang, Y., Somani, K., & Acharya, D. (2011). A heuristic approach to the railroad track maintenance scheduling problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26 (2), 129–145. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00670.x> [in English]
18. Charnes, A., & Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6 (1), 73–79. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.73> [in English]
19. Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). *Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications* (2nd ed.). CRC Press. [in English]

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7624-2925.

Лючков Дмитро Степанович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: :L_DS@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0001-7230-1986.

Ломотько Микола Денисович, PhD, асистент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: :kolyanl890@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-0294-2686.

Донець Світлана Михайлівна, кандидат філологічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: donets.inyazdep@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7191-0648.

Lomotko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7624-2925.

Lyuchkov Dmytro Stepanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: :L_DS@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0001-7230-1986.

Lomotko Mykola Denisovich, PhD, Assistant Professor of the Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: :kolyanl890@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-0294-2686.

Donets Svitlana Mykhailivna, PhD, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: donets.inyazdep@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7191-0648.

Дата надходження статті: 14.07.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

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