

УДК 656.212:004.942

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, О. В. КЛИГА², Є. В. ХАРЧЕНКО³

^{1*}Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350

²Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X

³Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університету науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (073) 321 02 94, ел. пошта kharchenko-e@ukr.net, ORCID 0009-0006-5633-0211

Моделювання составів поїздів у задачах техніко-експлуатаційної оцінки залізничних станцій

Мета. Основною метою роботи є вдосконалення методів моделювання составів поїздів та маневрових передач, що надходять в обслуговування на залізничних станціях. **Методика.** Задача формування розрахункових составів належить до задач експлуатації залізничного транспорту. Для її розв'язання використано методи дослідження операцій: статистичний аналіз для визначення кількості вагонів у розрахунковому вагонопотоці; регресійний аналіз для встановлення залежності між кількістю призначень, довжиною составів та кількістю відцепів; лінійне цілочисельне програмування для розподілу відцепів по складах; теорія ймовірностей для розподілу вагонів по складах. **Результати.** Виконання графічного та імітаційного моделювання станційних процесів вимагає формування розрахункових составів. Вихідними даними для оцінки техніко-технологічних параметрів станцій, які доступні без проведення спеціальних досліджень, є кількість вагонів, що прибувають на певні призначення протягом розрахункового періоду, та кількість вагонів у складах поїздів і маневрових передач. На підставі наведених вихідних даних необхідно розподілити вагони по складах таким чином, щоб структура составів відповідала умовам роботи залізничної мережі. Для розв'язання цієї задачі розроблено методику та алгоритм моделювання составів поїздів і маневрових передач. Методика формування розрахункових составів передбачає виконання шести послідовних етапів: визначення кількості вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагонопотоці, що прибувають протягом доби; визначення кількості розрахункових составів, що надходять із вхідного потоку, та кількості вагонів у них; визначення середньої кількості відцепів у розрахункових складах; встановлення кількості відцепів у складах; розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах; виділення вагонів із технічними та комерційними несправностями. **Наукова новизна.** У роботі вдосконалено метод моделювання розрахункових составів, які використовують у задачах техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій та під'їзних колій промислових підприємств. **Практична значимість.** Запропонований метод дозволяє інженерам-технологам та проектувальникам на підставі обмеженої кількості вихідних даних формувати состави поїздів із подальшим їх використанням для розв'язання прикладних задач експлуатації залізниць.

Ключові слова: залізничний транспорт; перевезення вантажів; залізничні станції; під'їзна колія; імітаційне моделювання

Вступ

Станції є одним з основних елементів залізничної інфраструктури. Вони забезпечують безпосередній зв'язок залізничного транспорту з населенням, промисловістю, будівельним комплексом, сільським господарством. На залізничних станціях виконують початкові та кінцеві операції перевізного процесу: посадку та висадку пасажирів, навантаження та вивантаження

вантажів, технічне обслуговування, екіпірування і ремонт рухомого складу, комерційний огляд вантажних вагонів, прикордонний і митний огляд на кордоні. Станції є стиковими пунктами залізниць з іншими видами транспорту.

Не менш важливе значення залізничні станції мають для промислового транспорту підприємств. Вони забезпечують функціонування виробничих цехів шляхом підвезення сировини та відвантаження готової продукції. Також через

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

під'їзні колії станції забезпечують зв'язок між промисловим залізничним транспортом та залізничним транспортом загального користування.

Залізничні станції є великими системами, що ускладнює проведення фізичних експериментів з ними. Тому для техніко-експлуатаційного аналізу роботи станцій в основному застосовують аналітичні, графічні та імітаційні моделі.

Вказані фактори свідчать, що дослідження, спрямовані на вдосконалення методів моделювання станційних процесів, є актуальними для залізничного транспорту.

Мета

Основною метою роботи є вдосконалення методів моделювання составів поїздів та маневрових передач, що надходять в обслуговування на залізничних станціях.

Методика

Потреба в описі составів виникла разом із появою методів техніко-експлуатаційного аналізу роботи станцій. Перші наукові дослідження в галузі залізничного транспорту ґрунтувались на методах аналітичного моделювання. Їх проводив на початку XX сторіччя професор О. Фролов із метою нормування тривалості елементарних маневрових операцій та академік В. Образцов із метою проектування залізничних станцій.

У зв'язку з різким збільшенням обсягів перевезень залізничним транспортом в СРСР у 1930-х роках виникла необхідність удосконалення методів нормування тривалості маневрових операцій. Значний внесок у вирішення цього завдання зробив професор І. Васильєв. Результатом його досліджень стали аналітичні залежності, що дозволяли встановлювати зв'язок між параметрами составів та тривалістю маневрових операцій з ними. Вказані дослідження були узагальнені в книзі «Графіки та розрахунки з організації залізничних перевезень». Викладені положення стали основою для методики нормування, яку використовують на залізничному транспорті до тепер. Проблемам розвитку аналітичних методів розрахунку норм часу на виконання маневрових операцій та оцінки історичного доробку вчених, що його забезпечували, присвячені роботи [5, 6, 12].

В аналітичних моделях, як правило, групи вагонів описують двома параметрами, при цьому обов'язковим параметром є число вагонів у составі. Додатковим параметром може, наприклад, бути кількість відцепів у составі, імовірність розчеплення состава під час маневрів, число колій, на яких розташовані групи вагонів состава перед збиранням. Застосування цих даних дозволяє визначати середні витрати часу на виконання таких технологічних операцій, як сортування составів, закінчення їх формування та інші. Джерелами інформації про довжину составів є добові плани-графіки виконаної роботи, норми довжини составів, встановлені технічно-розпорядчими актами станцій або проектною документацією. Як правило, оцінка довжини маневрових составів не викликає труднощів. З іншого боку, для оцінки кількості вагонів у відчепках чи ймовірності розчеплення составів необхідно проводити спеціальні дослідження, що ґрунтуються на обробці даних первинних документів чи спостережень [2]. Необхідність проведення цих досліджень суттєво ускладнює збір вихідних даних для моделювання процесів реальних станцій, а для станцій, які ще перебувають на стадії проектування, ці параметри можуть бути лише прийнятні. Нормативні документи з розробки технології роботи залізничних станцій загального користування не [4, 7, 8] не містять пояснень щодо вибору розрахункових составів. Водночас посібник з проектування промислових залізничних станцій до Будівельних норм і правил 2.05.07–85 (далі за текстом ППЗС) містив таблиці для вибору числа відцепів у составі залежно від числа вагонів і кількості призначень. Необхідно наголосити, що ППЗС орієнтований на аналітичні методи оцінки техніко-експлуатаційних показників роботи станцій. Через це в розрахунках можливе використання усереднених дробових значень числа вагонів та відцепів у составах. Фактично ці параметри можуть набувати включно цілих значень.

Залізничні станції являють собою багатоканальні, багатофазні керовані системи масового обслуговування. Через таку характеристику станцій побудова аналітичних моделей, що адекватно відображають процеси їх функціонування, є складною задачею. Тому для детального аналізу взаємодії різних елементів станцій між со-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

бою з початку XX сторіччя набули розвитку методи графічного моделювання. Графічною моделлю функціонування станції є її добовий план-графік [4, 7, 8]. Він являє собою відображення роботи станції на спеціальному бланку, де умовними позначеннями показано основні виробничі операції, що відбуваються в її підсистемах. Тривалість окремих операцій при цьому визначають усереднено за аналітичними методами.

Як показують виконані в [13] дослідження, через різне розташування вагонів у групах тривалість виконання операцій з кожним окремих составом може суттєво відрізнятись від середнього. Тому фактична тривалість виконання операцій на станціях є випадковою величиною. Заміна під час моделювання системи масового обслуговування з випадковою тривалістю операцій на систему масового обслуговування з постійною тривалістю операцій викликає похибки в оцінюванні техніко-експлуатаційних показників станцій, що показано у [3]. Водночас побудова добових планів-графіків вручну є складною задачею, що вимагає значних витрат часу. Через це такі похибки вважали допустимими.

Особливо чутливими до розподілу вагонів на групи є моделі розформування составів на сортувальних гірках. Це пов'язано з тим, що умови розподілу на стрілках різко погіршуються в разі послідовного скочування одновагонних відцепів. У зв'язку з цим в [1] під час моделювання составів, які розформовують на сортувальних гірках, запропоновано застосовувати геометричний розподіл імовірності призначення вагонів у составі. Цей розподіл являє собою матрицю, перший рядок якої відповідає першому вагону состава, наступні рядки відповідають призначенню попереднього вагона; стовпці матриці відповідають призначенню наступного вагона. Елементи матриці відповідають імовірності появи вагона певного призначення першим у составі або за попереднім вагоном певного призначення. Заповнення матриці даними здійснюють на основі обробки сортувальних листків або розмічених натурних листків за попередні періоди. Такий підхід дозволяє отримувати состави, розташування вагонів у яких максимально наближено до реальних. Проблемним є застосування методу, запропонованого в [1], для вдосконалення роботи станцій. Як правило, моделювання

роботи станцій пов'язано з їх проектуванням або зміною умов роботи. При цьому порядок побудови матриць геометричного розподілу ймовірностей призначення вагонів у складах для неіснуючих станцій та неіснуючих умов роботи в наукових працях не розкривають.

Розвиток електронно-обчислювальної техніки та програмних засобів забезпечив створення потужного інструменту для оцінки техніко-експлуатаційних характеристик станцій – імітаційного моделювання. Сучасні імітаційні моделі дозволяють реалізувати два підходи. В одному з підходів состави розглядають як єдині об'єкти, а тривалість технологічних операцій визначають за аналітичними виразами відповідно до їхніх параметрів [9, 11]. Фактично такий підхід заснований на тих самих принципах, що і графічне моделювання, однак дозволяє значно швидше отримувати оцінку роботи станцій за рахунок автоматизації рутинних операцій. В іншому підході состави розглядають як множину окремих вагонів і тривалість операцій з ними як суму тривалості операцій з окремими вагонами. Такий більш детальний підхід реалізовано зокрема в роботах [10, 14, 15]. Представлені в них імітаційні моделі як одну зі своїх частин мають генератори вхідного потоку составів, однак принципи роботи цих генераторів не розкрито.

Результати

Вихідними даними для виконання оцінки техніко-експлуатаційних параметрів станцій, які доступними без виконання спеціальних досліджень, є кількість вагонів, що прибувають за певними призначеннями протягом розрахункового періоду, та кількість вагонів у складах поїздів і маневрових передач. На підставі наведених вихідних даних необхідно розподілити вагони по складах таким чином, щоб структура составів відповідала умовам роботи залізничної мережі. Для розв'язання цієї задачі розроблено алгоритм моделювання составів поїздів і маневрових передач.

Для вихідних даних використано такі позначення: кількість призначень D ; місячні обсяги прибуття вагонів за кожним призначенням $n_{m,i}$ (тут i – номер призначення, $i = \overline{1..D}$); імовірності появи вагонів з комерційними чи технічними

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

несправностями різних призначень $p_{d,i}$; коефіцієнт добової нерівномірності k_d ; максимальна кількість вагонів у складах m . Вказані дані можуть бути отримані на підставі аналізу експлуатованих залізничних станцій та під'їзних колій або задані у вигляді нормативних значень для проєктованих об'єктів. Задача формування розрахункових складів належить до задач експлуатації залізничного транспорту. Для її розв'язання використовують методи дослідження операцій: статистичний аналіз для визначення кількості вагонів у розрахунковому вагонопотоці; регресійний аналіз для встановлення залежності між кількістю призначень, довжиною складів та кількістю відцепів; лінійне цілочисельне програмування для розподілу відцепів по складах; теорію ймовірностей для розподілу вагонів з іншими призначеннями та вагонів із технічними і комерційними несправностями по складах. Задача формування розрахункових складів є цілочисельною, оскільки і кількість вагонів, і кількість відцепів можуть набувати лише цілих значень.

Методика формування розрахункових складів передбачає виконання шести послідовних етапів. Залежно від змісту конкретної прикладної задачі окремі початкові та кінцеві етапи можуть бути пропущені.

На першому етапі визначають кількість вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагонопотоці, що прибувають протягом доби. Загальну добову кількість вагонів встановлюють на підставі розрахункового місячного вагонопотоку за формулою:

$$N_d = \left\lceil \frac{k_d \sum_{i=1}^D n_{m,i}}{30} \right\rceil,$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – операція округлення до цілого числа.

Коефіцієнти добової нерівномірності враховують випадки підвищення обсягів роботи залізничних станцій в окремі доби, їх установлюють на підставі аналізу обсягів перевезень у попередні періоди або приймають залежно від виду перевезень: для внутрішньозаводських перевезень $k_d = 1,1$; для всіх інших перевезень $1,15 \leq k_d \leq 1,2$.

Для вагонопотоків залізничних станцій та під'їзних колій характерна наявність основних і додаткових призначень. Вагони основних призначень надходять в обробку систематично, їх обов'язково включають до розрахункового вагонопотоку. Вагони додаткових призначень з'являються епізодично. Прикладом додаткових призначень можуть бути вагони з обладнанням, що прибувають на підприємства один раз на декілька місяців. Окремі вагони цих призначень можуть вимагати значних витрат часу на їх обслуговування, однак імовірність одночасної появи цих вагонів є невисокою. Для визначення переліку основних призначень усі призначення упорядковують за зменшенням кількості вагонів у них. Після цього відбирають D_0 призначень, частка яких у загальному вагонопотоці складає не менше p_n . Величину p_n встановлює людина, що виконує моделювання. У загальному випадку $p_n = 0,9$. Кількість вагонів основних призначень визначають так:

$$n_{d,i} = \left\lceil \frac{k_{d,i} n_{m,i}}{30} \right\rceil; \quad i = \overline{1..D_0}.$$

Призначення для залишку $N_d - \sum n_{d,i}$, $i = \overline{D_0 + 1, D}$ вагонів обирають випадковим чином із множини вагонів $N_{m,i}$, $i = \overline{D_0 + 1, D}$ виходячи з умови, що кожен вагон додаткового призначення може з'явитись у розрахунковому вагонопотоці з однаковою ймовірністю. Після цього фіксують кількість додаткових призначень та загальну кількість призначень, вагони яких були включені до розрахункового вагонопотоку D_d та $D_p = D_0 + D_d$ відповідно.

На другому етапі визначають кількість розрахункових складів, що надходять із вхідного потоку, та кількість вагонів у них. Кількість складів та середню кількість вагонів у складах визначають за виразами:

$$b = \left\lceil \frac{N_d}{m} \right\rceil; \quad m_{cp} = \frac{N_d}{m}.$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – операція округлення до більшого цілого числа.

Користувач може обрати один з двох варіантів розрахунку кількості вагонів у складах m_j (тут $i = \overline{1..b}$). Перший варіант передбачає прибуття $b-1$ складів по m вагонів та одного неповного складу із $N_d + m - bm$ вагонів. Другий варіант передбачає прибуття складів випадкової довжини в межах $[m - \Delta_m, m]$ вагонів, де Δ_m – допустима величина зменшення довжини склада, яку встановлює користувач:

$$\Delta_m \geq \left[b - \frac{N_d}{m} \right]$$

Третім етапом є визначення середньої кількості відчепів g_p у розрахункових складах. За наявності статистичних даних спостережень кількості відчепів у складах може бути розрахована на підставі заданої користувачем середньої довжини відчепа $m_{\text{від}}$. За відсутності статистичних даних для визначення середньої кількості відчепів у складах адаптовано методику, що наведена в ППЗС. Із метою зменшення впливу на параметри розрахункових складів малопотужних призначень попередньо визначають кількість умовних призначень:

$$D_y = \frac{N_d D_p}{N_d \sqrt{D_p \sum_{i=1}^{D_p} \left(n_{d,i} - \frac{N_d}{D_p} \right)^2}}$$

Для визначення кількості відчепів у складах на основі нормативних таблиць ППЗС отримано регресійні залежності. У ході дослідження виконано апроксимацію цих даних 20 різними виразами. Для розрахунку кількості відчепів у складах запропоновано використовувати вираз:

$$g_p = aD_y^b; \quad g_p \leq c,$$

де a , b , c – коефіцієнти, значення яких обрано з табл. 1.

Відхилення кількості відчепів у складі, які розраховують за запропонованою методикою, від кількості відчепів, яку визначають за ППЗС, не перевищує 5 %. Для проміжних значень $m_{\text{сп}}$ величину g_p встановлюють інтерполяцією.

Таблиця 1

Коефіцієнти для розрахунку кількості відчепів

Table 1

Coefficients for calculating the number of cuts

$m_{\text{сп}}$	a	b	c
5	2,9284	0,2965	4,9
10	3,5451	0,3535	8,7
15	4,6327	0,2926	9,8
20	5,4823	0,2769	13,8
25	6,5559	0,2449	15,9
30	7,4513	0,2337	17,9
35	8,3986	0,2212	21,3
40	9,3274	0,2106	24,3
45	10,3895	0,1966	25,9
50	11,4706	0,1847	27,0
55	12,4917	0,1768	28,1
60	13,4183	0,1733	29,5

Четвертим етапом є встановлення кількості відчепів у складах g_j . Вибір величин g_j здійснюють з умови, що вона повинна перебувати в межах від q до $q + \Delta g$. Величини q та Δg задає користувач, за замовчуванням вони складають:

$$q = \lfloor g_p \rfloor, \Delta g = 1.$$

Середня кількість відчепів у складах при цьому повинна бути максимально наближена до величини g_p , встановленої на третьому етапі:

$$\left| \frac{\sum_{j=1}^b g_j}{b} - g_p \right| \rightarrow \min.$$

Кількість відчепів у складах g_j встановлюють на підставі розв'язання двох оптимізаційних задач цілочисельного програмування:

$$\sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q + j - 1) - g_p \rightarrow \min;$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q+j-1) - g_p \geq 0 \\ \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j = b, \quad x_j \geq 0 \end{cases}$$

та

$$g_p - \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q+j-1) \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} g_p - \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q+j-1) \geq 0 \\ \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j = b, \quad x_j \geq 0, \end{cases}$$

де x_j – ціле число составів із заданою кількістю відчепів.

Як остаточне використовують той розв'язок тієї задачі, цільова функція якого приймає менше значення.

П'ятим етапом є розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах. Приклад розподілу 18 вагонів 6 призначень по двох складах, що повинні мати 7 та 6 відчепів, наведено на рис. 1.

Початковий розподіл вагонів по складах (див. рис. 1, а) здійснюють випадковим чином з умови, що кожен вагон може опинитися на будь-якому місці в складах з однаковою імовірністю.

а – а

1	5	3	3	2	4	5	5	2	состав 1 - 7 відчепів
4	1	4	6	5	1	2	2	4	состав 2 - 8 відчепів

б – б

1	2	2	3	3	4	5	5	5	состав 1 - 5 відчепів
1	1	2	2	4	4	4	5	6	состав 2 - 5 відчепів

в – в

5	4	5	3	5	2	3	1	2	состав 1 - 9 відчепів
6	5	4	2	4	1	4	2	1	состав 2 - 9 відчепів

г – г

1	5	3	3	2	4	5	5	2	состав 1 - 7 відчепів
4	4	1	1	6	5	2	2	4	состав 2 - 6 відчепів

Рис. 1. Розподіл вагонів по складах:

а – початковий випадковий розподіл вагонів у складах;

б – склади з мінімальною кількістю відчепів;

в – склади з максимальною кількістю відчепів;

г – склади із заданою кількістю відчепів

Fig. 1. Distribution of cars among train sets:

а – initial random distribution of cars within the train sets;

б – train sets with the minimum number of cuts;

в – train sets with the maximum number of cuts;

г – train sets with the specified number of cuts

Мінімальної кількості відчепів у складах $g_{\min,i}$ досягають у разі упорядкування вагонів за призначеннями (див. рис. 1, б). Максимальної кількості відчепів у складах $g_{\max,i}$ досягають в умовах, коли вагони додають до склада по чергово до тих пір, поки додавання вагона наступного призначення призводить до утворення нового відчепа (див. рис. 1, в). Якщо для деяких составів $g_{p,i} < g_{\min,i}$, або $g_{p,i} > g_{\max,i}$, то виконують перерозподіл вагонів між складами. Якщо для всіх составів $g_{\min,i} \leq g_{p,i} \leq g_{\max,i}$, то заданої кількості відчепів у складах досягають зміною порядку розташування вагонів (див. рис. 1, г).

Шостим етапом є виділення вагонів із технічними та комерційними несправностями. Появу вагонів із несправностями моделюють як випадкову подію. Загальну кількість вагонів із несправностями, що повинні бути наявними в розрахунковому вагонопотоці, визначають за виразом:

$$r_n = \left[\sum_{i=1}^{D_p} p_{n,i} n_{d,i} \right],$$

де $p_{n,i}$ – імовірність затримки вагонів i -го призначення через технічні або комерційні несправності.

Імовірності $p_{n,i}$ можуть бути прийняті на основі обробки даних аналізу документів наявних залізничних станцій та під'їзних колій. Для проєктованих об'єктів імовірності p_n , можуть бути прийняті залежно від виду вантажу за табл. 2.

Таблиця 2

Імовірності затримки вагонів через технічні або комерційні несправності

Table 2

Probabilities of wagons detention due to technical or commercial faults

Вид вантажу	p_n
Зернові вантажі	0,066
Навальні вантажі, наливні вантажі, обладнання, контейнери	0,003
Інші вантажі	0,011
Порожні вагони під завантаження	0,100

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Після визначення загальної кількості вагонів із несправностями встановлюють випадкове розташування цих вагонів у складах. Імовірність того, що i -й вагон розрахункового потоку з n вагонів буде затриманий через технічну або комерційну несправність, складає:

$$p_{3,i} = \frac{p_{n,i}}{\sum_j^n p_{n,i}}.$$

Вибір номера вагона k з несправністю здійснюють за умовою:

$$k \rightarrow \min, \quad k = \overline{1..n};$$

$$R \leq \sum_i^k p_{3,i},$$

де R – випадкове число, що рівномірно розподілено в інтервалі від 0 до 1.

Під час визначення розташування першого вагона з несправністю величину n приймають рівною N_d . Після вибору наступного вагона з несправністю величину n зменшують на 1.

Основна перевага наведеної методики над методикою, викладеною в ППЗС, полягає в тому, що вона дозволяє формувати розрахункові склади з деталізацією до розташування окремих вагонів, а ППЗС забезпечує лише встановлення середньої кількості вагонів та відчепів у складах. Недоліком запропонованої методики порівняно з методикою [1] є те, що вона не дає можливості відтворити взаємозв'язки в порядку прямування окремих відчепів, однак для більшості задач експлуатації залізниць цей порядок не впливає на остаточні рішення. Перевага запропонованої методики над методикою [1] полягає в тому, що отримання вихідних даних для формування складів не потребує обробки інформації з первинних джерел та проведення спостережень над роботою об'єктів залізничного транспорту.

Запропонована методика програмно реалізована. Основне вікно програми наведено на рис. 3. Її використання обмежує вплив людського фактора на результати перевірки відповідності технічного забезпечення залізничних станцій і під'їзних колій наявним та плановим обсягам роботи.

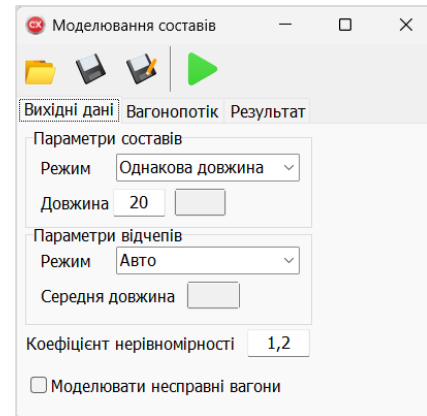


Рис. 2. Вікно програми моделювання складів

Fig. 2. Window of the train sets modeling program

Наукова новизна та практичне значення

У роботі вдосконалено методику моделювання розрахункових складів, які використовують у задачах техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій та під'їзних колій промислових підприємств.

Запропонована методика дозволяє інженерам-технологам та проектувальникам на підставі обмеженої кількості вихідних даних формувати склади поїздів із подальшим їх використанням для розв'язання прикладних задач експлуатації залізниць.

Висновки

Виконані дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Графічне та імітаційне моделювання станційних процесів вимагає формування розрахункових складів. Наявні методи розв'язання цієї задачі або лише встановлюють середнє число вагонів та відчепів у складах, або вимагають значних ресурсів на збір вихідних даних. Для сучасних імітаційних моделей необхідні склади, у яких деталізовано розташування окремих вагонів.

2. Методика формування розрахункових складів передбачає виконання шести послідовних етапів: визначення кількості вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагоно-

потоці, що прибувають протягом доби; визначення кількості розрахункових составів, що надходять із вхідного потоку, та кількості вагонів у них; визначення кількості відцепів у розрахункових складах; встановлення кількості відцепів у складах; розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах; виділення вагонів із те-

хнічними та комерційними несправностями. Запропоновану методику було програмно реалізовано. Вона дозволяє обмежити вплив людського фактора на результати перевірки відповідності технічного забезпечення залізничних станцій і під'їзних колій наявним та плановим обсягам роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский В. И. Эргатические модели сортировочных горок. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 2001. № 5. С. 7–11.
2. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Організація передпроектного обстеження залізничних станцій та вузлів. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. Вип. 7. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/35985>
3. Коробйова Р. Г. Інформаційна модель для аналізу станційних процесів на ЕОМ. *Наука та транспортний прогрес*. 2010. Вип. 31. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13473>
4. *Рекомендований технологічний процес роботи вантажної станції*. Київ : ТОВ “НВП Поліграфсервіс”, 2005. 224 с.
5. Стрелко О. Г. Аналіз наукового доробку професора О. М. Фролова (1863–1939) в галузі експлуатації залізниць. *Наукові праці історичного факультету Запорізького національного університету*. 2015. Вип. 43. С. 361–365.
6. Стрелко О. Г., Бердниченко Ю. А. Роль академіка В. М. Образцова в розробці проблем комплексного розвитку транспорту. *Історія науки і техніки*. 2016. Т. 6, № 8. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61>
7. ЦД-0018 *Типовий технологічний процес роботи дільничної станції*. Київ : Укрзалізниця, 1998. 243 с.
8. ЦД-0017 *Типовий технологічний процес роботи сортувальної станції*. Київ : Укрзалізниця, 1998. 243 с.
9. Čamaj J., Nedeliaková E., Šperka A., Ližbetinová L. The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.005>
10. Galadiková A., Adamko N. Simulation-based methods to support the real-time management of railways nodes. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 1345–1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.119>
11. Johansson I., Palmqvist C.-W., Sipilä H., Warg J., Bohlin M. Microscopic and macroscopic simulation of early freight train departures. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. Vol. 21. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100295>
12. Kozachenko D. M., Verlan A. I., Korobiova R. H. Development of Analytical Methods for Calculating Time Standards for Shunting Operations. *Science and Transport Progress*. 2021. № 1 (91). P. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228097>
13. Kozachenko D., Gera B., Taran I., Korobiova R., Malashkin V., Hermaniuk Yu. Improvement of the Method of Time Rationing for Assembling Car Groups on One Track. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. No. 1. P. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/147>
14. Li B., Yun C., Xu G., Zhou X., Xuan H. Optimization of Simultaneous Delivery and Pickup Wagon Scheme on Hybrid Siding Network of Railway Terminal. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. Vol. 2022. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6713617>
15. Sadeghi M., Bagheri M., Pishvae M. S. Evaluation of rail terminals in container ports using simulation: A case study. *SIMULATION*. 2021. Vol. 97. Iss. 12. P. 809–820. DOI: <https://doi.org/10.1177/00375497211024731>

D. M. KOZACHENKO^{1*}, O. V. KLYGA², Ye. V. KHARCHENKO³^{1*}Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350²Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X³Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (073) 321 02 94, e-mail kharchenko-e@ukr.net, ORCID 0009-0006-5633-0211

Modeling of Train Sets in Tasks of Railway Stations Technical and Operational Evaluation.

Purpose. The purpose of the paper is to improve the methods of modeling train sets and shunting compositions that arrive for servicing at railway stations. **Methodology.** The task of train sets forming belongs to the tasks of railway transport studies. For its solution, operations research methods are used: statistical analysis to determine the number of cars in the design car flow; regression analysis to establish the relationship between the number of destinations, the length of the train set, and the number of cuts; linear integer programming for the distribution of cuts among the train sets; probability theory for the distribution of cars among the train sets. **Findings.** The execution of graphical and simulation modeling of station processes requires the formation of train sets design. The input data for performing the evaluation of the technical and technological parameters of stations, which are available without conducting special studies, are the number of cars arriving at specific destinations during the design period and the number of cars in the train sets and shunting compositions. Based on the provided input data, it is necessary to distribute the cars among the train sets in such a way that the structure of the consists corresponds to the operating conditions of the railway network. To solve this task, a methodology and algorithm for modeling the train sets and shunting compositions have been developed. The methodology for the formation of train sets includes the execution of six sequential stages: determining the number of cars for each specific destination in the design car flow arriving during the day; determining the number of train sets arriving from the incoming flow, and the number of cars in them; determining the average number of cuts in the designed train sets; establishing the number of cuts in the train sets; distributing the cars of the design car flow among the train sets; identifying cars with technical and commercial faults. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the fact that it improves the method of modeling design train sets used in the tasks of technical and operational evaluation of railway stations and sidings of industrial enterprises functioning. **Practical value.** The practical significance of the work lies in the fact that the proposed method allows process engineers and designers on the basis of a limited amount of input data, to form train sets for their further use in solving applied tasks of railway operation.

Keywords: railways; cargoes transportation; railway stations; industrial siding; simulation

REFERENCES

1. Bobrovskiy, V. I. (2001). Ergaticheskie modeli sortirovochnykh gorok. *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 5, 7-11. (in Ukrainian)
2. Kozachenko, D. M., Vernyghora, R. V., & Ghorbova, O. V. (2014). Organization of the pre-survey train stations and nodes. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 7, 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/35985> (in Ukrainian)
3. Korobjova, R. H. (2013). The information model for the analysis of plant processes on the computer. *Science and Transport Progress*, 31, 50-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13473> (in Russian)
4. *Rekomendovanyi tekhnolohichni protses roboty vantazhnoi stantsii*. (2005). Kyiv: TOV «NVP Polihrafservis». (in Ukrainian).
5. Strelko, O. G. (2015). The analysis of the professor O. M. Frolov's scientific heritage (1863-1939) in the field of railway operation. *Scholarly Works of the Faculty of History, Zaporizhzhya National University*, 43, 361-365. (in Ukrainian)
6. Strelko, O., & Berdnychenko, Yu. (2016). The role of academician V. M. Obraztsov in the development of complex transport development issues. *History of Science and Technology*, 6(8), 52-61. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61> (in Ukrainian)
7. *TsD-0018 Typovyi tekhnolohichni protses roboty dilnychnoi stantsii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)

8. *TsD-0017 Typovyi tekhnologichnyi protses roboty sortuvalnoi stantsii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)
9. Čamaj, J., Nedeliaková, E., Šperka, A., & Ližbetinová, L. (2021). The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools. *Transportation Research Procedia*, 53, 39-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.005> (in English)
10. Galadíková, A., & Adamko, N. (2021). Simulation-based methods to support the real-time management of railways nodes. *Transportation Research Procedia*, 55, 1345-1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.119> (in English)
11. Johansson, I., Palmqvist, C.-W., Sipilä, H., Warg, J., & Bohlin, M. (2022). Microscopic and macroscopic simulation of early freight train departures. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 21, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100295> (in English)
12. Kozachenko, D. M., Verlan, A. I., & Korobiova, R. H. (2021). Development of Analytical Methods for Calculating Time Standards for Shunting Operations. *Science and Transport Progress*, 1(91), 51-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228097> (in English)
13. Kozachenko, D., Gera, B., Taran, I., Korobiova, R., Malashkin, V., & Hermaniuk, Yu. (2024). Improvement of the Method of Time Rationing for Assembling Car Groups on One Track. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 147-153. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/147> (in English)
14. Li, B., Yun, C., Xu, G., Zhou, X., & Xuan, H. (2022). Optimization of Simultaneous Delivery and Pickup Wagon Scheme on Hybrid Siding Network of Railway Terminal. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6713617> (in English)
15. Sadeghi, M., Bagheri, M., & Pishvae, M. S. (2021). Evaluation of rail terminals in container ports using simulation: A case study. *SIMULATION*, 97(12), 809-820. DOI: <https://doi.org/10.1177/00375497211024731> (in English)

Надійшла до редколегії 28.02.2025

Прийнята до друку 26.06.2025