

УДК 656.225

Р. В. ВЕРНИГОРА<sup>1\*</sup>, Р. Г. КОРОБЙОВА<sup>2</sup>, О. І. ПРОКОПА<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університету науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 12, ел. пошта gv.vernigora@gmail.com, ORCID 0000-0001-7618-4617

<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університету науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта rgkorobyova@gmail.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

<sup>3\*</sup>Каф. «Транспортні вузли», Український державний університету науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 468 47 11, ел. пошта oleg.prokopa@gmail.com, ORCID 0009-0009-6721-4605

## ПРОБЛЕМИ РОЗПОДІЛУ ВАНТАЖОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**Мета.** Метою статті є критичний аналіз існуючих методів розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі та визначення напрямків адаптації цих методів до умов функціонування залізничного транспорту України. **Методика** Дослідження виконані на підставі обробки літературних джерел у наукометричних базах Scopus та Google Scholar. **Результати.** Розподіл вагонопотоків на мережі залізниць є одним із етапів розробки плану формування поїздів. Методи вирішення цієї задачі, які використовуються наразі в практичній роботі залізничного транспорту, склалися за часів планової державної економіки. Вони ґрунтуються на вирішенні однокритеріальної задачі оптимізації, спрямованої на пошук такого розподілу вагонопотоків на мережі, що мінімізує собівартість перевезень для залізниці. Реформування ринку залізничних перевезень з метою впровадження конкуренції, вимагає ускладнення методів розв'язання задачі розподілу вагонопотоків для урахування суперечливих цілей незалежних між собою учасників перевізного процесу. Виконані дослідження показали, що основним методом моделювання структури залізничної транспортної мережі та обсягів вагонопотоків у ній є теорія графів; визначення пропускної спроможності елементів залізничної мережі здійснюється методами теорії експлуатації залізниць, імітаційного моделювання та кореляційного аналізу; визначення оптимального розподілу пропускної спроможності здійснюється шляхом порівняння конкуруючих варіантів, а також методами лінійного та нелінійного програмування, методами адаптивного управління із застосуванням нейронних мереж; поведінка учасників процесу перевезень під час розподілу пропускної спроможності досліджується методами теорії ігор. Встановлено, що в сучасних умовах додаткового дослідження вимагає задача визначення критерію рівноправного доступу до перевантажених дільниць на розгалуженій залізничній мережі та задача розподілу вагонопотоків на мережі в умовах коливання вагонопотоків при перевезеннях постійними поїздами та поїздами на замовлення. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у критичному аналізі та узагальненні сучасних методів, що використовуються для вирішення проблеми розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі. **Практична значимість** Практична значимість результатів полягає у визначенні невідповідності методів, які практично використовуються на залізницях України для розподілу вагонопотоків, сучасним умовам експлуатації залізничного транспорту. Встановлено наукові методи, що дозволяють удосконалити підходи до вирішення задачі раціонального розподілу вагонопотоків з урахуванням інтересів різних учасників перевізного процесу.

*Ключові слова:* залізничний транспорт, перевезення вантажів, пропускна спроможність, вагонопотік, оптимізація

### Вступ

Залізничний транспорт є основним перевізником вантажів в Україні. На його частку припадає 50,6% від обсягу вантажних перевезень усіх видів транспорту. Україна має розвинену залізничну мережу. Експлуатаційна довжина залізничних колій загального користування складає 19,8 тис. км. Переважно залізнична мережа України була побудована за часів Радянського Союзу для потреб планової економіки Української СРСР. Після набуття Україною незалежності відбулися суттєві зміни умов роботи

залізничного транспорту. Загальне падіння обсягів роботи мережі складає 60...70% від рівня 1991 року. Однак, в той же час, через зміну напрямків руху вагонопотоків, завантаження окремих напрямків, особливо до морських портів та сухопутних прикордонних переходів, перевищило обсяги їх роботи за часів СРСР і досягло розрахункового значення. Різні ділянки мережі обслуговуються різними видами тяги. Електровозною тягою обслуговується 47 % залізничної мережі, а тепловозною 53%. Враховуючи, що собівартість перевезення вантажів електричною

тягою на 40...60% нижче ніж тепловозною, то вид тяги суттєво впливає на вибір маршрутів руху вантажопотоків. Ринкові реформи, що відбуваються в економіці України, призвели до появи незалежних суб'єктів – операторів вагонів, які забезпечують виконання перевезень. Тому наразі вибір маршрутів руху поїздів впливає на показники використання рухомого складу не лише Укрзалізниці, а й незалежних від неї операторів вагонів. Очевидно, що зазначені процеси будуть лише посилюватися у зв'язку із євроінтеграційними прагненнями України. В цих умовах вибір маршрутів руху поїздів є актуальною задачею для економіки України.

### Мета

Метою цього дослідження є критичний аналіз існуючих методів раціонального розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі та визначення напрямків їх адаптації до сучасних умов функціонування залізниць України.

### Методика

Дослідження у цій роботі виконані на підставі обробки літературних джерел у наукометричних базах Scopus та Google Scholar.

### Результати

Розподіл вагонопотоків на мережі залізниць є одним із етапів розробки плану формування поїздів. В ході вирішення цієї задачі визначаються найбільш економічно ефективні напрямки прямування вагонопотоків, які забезпечують мінімум витрат на власне рух, а також формування та розформування поїздів. Крім того, для можливих напрямків руху оцінюють тривалість проходження вагонами ділянок і станцій, витрати палива на виконання маневрової роботи, а також пропускну спроможність ділянок та переробну спроможність станцій. На практиці вибір напрямку вагонопотоків на мережі залізниць здійснюється на основі техніко-економічного порівняння відібраних варіантів. Згідно з [11] за наявності декількох паралельних залізничних ліній витрати на відхилення вагонопотоку по кожній окремій лінії в загальному вигляді розраховується за формулою

$$E = N_v (\sum E_p + \sum E_n) + \sum M E_{рл}, \quad (1)$$

де  $N_v$  - обсяг відхиленого вагонопотоку, ваг;

$\sum E_p$  – сума експлуатаційних витрат, які залежать від розмірів руху, на пересування вагона по всіх ділянках даної лінії, грн.;

$\sum E_n$  – додаткові витрати на переформування поїздів або зміну їх маси та довжини на

сортувальних та дільничних станціях, розрахована на 1 вагон, грн.;

$M$  – кількість резервних локомотивів по кожній ділянці, яка змінилася, при пропуску відхиленого вагонопотоку, лок;

$E_{рл}$  – витрати на проходження резервного локомотиву по ділянці, грн.

Першим недоліком такого підходу є те, що він пов'язаний зі значною долею суб'єктивізму при відборі варіантів для порівняння. Другий недолік пов'язаний з тим, що поїзди, які направляються за різними маршрутами, вважаються рівнозначними. Такий підхід був прийнятним за часів СРСР, коли переважна частина вантажів, залізнична інфраструктура, локомотиви та вагони належали державі. Однак в сучасних умовах вантажовідправники та оператори вагонів є суб'єктами господарювання різної форми власності. Через різні витрати часу на перевезення при прямуванні поїздів різними маршрутами вантажовласники отримують послугу різної якості. Проблеми існуючих методів організації вагонопотоків, що виникли після ринкових реформ в економіці України, представлені у статті [6]. За наявності приватних перевізників різні маршрути руху поїздів будуть пов'язані з різною величиною плати за доступ до інфраструктури та будуть забезпечувати різні показники ефективності рухомого складу для різних перевізників. Тому існуючий підхід до розподілу вагонопотоків на мережі не забезпечує рівноправний і недискримінаційний доступ вантажовідправників до громадських послуг перевізника і перевізників до послуг менеджера інфраструктури загального користування. Третій недолік існуючого підходу пов'язаний з тим, що він реалізується на основі детермінованого підходу, коли усі вихідні дані для отримання рішення відомі. В той же час, фактичні обсяги перевезень відрізняються від планових. Тому ця задача є стохастичною. У зв'язку з цим, існуючі методи розподілу вагонопотоків на мережі залізниць вимагають вдосконалення.

Задача розподілу вагонопотоків на мережі залізниць як в цілому, так і окремі її елементи, широко розглядається в фахових наукових роботах. Наразі розроблені методи оцінки витрат, які пов'язані з пропуском вагонопотоків по залізничним ділянкам та з їх переробкою на станціях, а також методи оцінки пропускну спроможності окремих елементів залізничної інфраструктури та мережі в цілому, методи розподілу вагонопотоків по мережі залізниць.

Витрати на пропуск вагонопотоків по залізничним ділянкам та на їх переробку на станціях

в сучасних умовах встановлюються методом витратних ставок [11]. З цією метою на підставі даних галузевої статистики залізниці розраховують витратні ставки, пов'язані з натуральними вимірниками своєї роботи. Далі на основі прогнозних значень натуральних вимірників роботи та витратних ставок на вимірник виконується оцінка собівартості перевезень. В цілому, за наявності якісного прогнозу натуральних вимірників роботи залізничного транспорту в даний час можна отримати достовірну економічну оцінку планової собівартості перевезень.

Одним із основних факторів, що впливають на розподіл вагопотоків по мережі залізниць, є обмеження пропускної спроможності залізничної інфраструктури. Пропускна спроможність залізниць у країнах Європейського Союзу та у Великобританії вимірюється кількістю поїздів певної категорії, які можуть бути пропущені по залізничній інфраструктурі за одиницю часу. Особливістю роботи залізничного транспорту Західної Європи є те, що переважна частина як вантажних, так і пасажирських поїздів, прямує за розкладом. Основними методами оцінки пропускної спроможності залізниць у Західній Європі є метод UIC 406 [12, 22], а у Великобританії метод CUI [13]. Ці методи ґрунтуються на стисненні розкладів, під час якого виконується перенесення діючих ниток графіка в межах певного інтервалу часу таким чином, щоб міжпоїздні інтервали були скорочені до мінімально допустимих значень. Проблеми практичного застосування методу UIC 406 наведені в статті [22], де зазначається, що на залізничних мережах з обмеженою пропускною спроможністю дільниць та станцій вдається знаходити кращі рішення у порівнянні з отриманими за допомогою методу UIC 406. Також існує проблема із застосуванням методу в умовах неоднорідності потоку поїздів за часом слідування та за перевізниками. Тому в даний час тривають дослідження, що спрямовані на вдосконалення методів побудови графіків руху. Зокрема, в роботі [14] запропоновано метод, який дозволяє збільшити кількість ниток поїздів на графіку в порівнянні з UIC 406. В країнах ЄС залізничні інфраструктури організовані у складні мережі. Питанням адаптації методу UIC 406 для оцінки пропускної спроможності залізничних мереж, що складаються з ділянок і станцій, присвячені роботи [15, 29].

Для залізниць Північної Америки характерні незначні обсяги пасажирських перевезень та перевезення вантажів без дотримання жорсткого розкладу. У США та Канаді для оцінки пропускної спроможності залізничних ділянок

використовується залежність між ступенем заповнення пропускної спроможності лінії та затримками, що виникають під час пропуску поїздів. Зокрема, такий підхід проілюстрований у роботі [17]. Наведені в [17] дані показують, що з ростом ступеня заповнення пропускної спроможності нелінійно зростає середня величина затримок поїздів і знижується гнучкість графіка. Спеціальні оглядові статті, присвячені аналізу методів оцінки пропускної спроможності наведені в [23, 26].

В Україні залізничний транспорт використовується як для перевезення пасажирів, так і для перевезення вантажів. При цьому пасажирські поїзди прямують за жорстким розкладом, а вантажні – відправляються за умовами накопичення составів без дотримання розкладу. Пропускна спроможність залізничних дільниць, подібно до того, як це здійснюється в країнах Західної Європи, оцінюється кількістю вантажних поїздів, які можуть бути пропущені додатково до поїздів постійного обертання (пасажирських, приміських, збірних та ін.). В умовах відсутності точної інформації про час відправлення вантажних поїздів оцінка виконується за аналітичним виразом відповідно до методики [9]

$$n_{\text{ван}} = n_{\text{н}}^{\text{пар}} - \varepsilon_{\text{пс}}^{\text{шв}} n_{\text{пс}}^{\text{шв}} - \varepsilon_{\text{пс}} n_{\text{пс}} - \varepsilon_{\text{прм}} n_{\text{прм}} - (\varepsilon_{\text{пр}} - 1) n_{\text{пр}} - (\varepsilon_{\text{зб}} - 1) n_{\text{зб}}, \quad (2)$$

де  $n_{\text{н}}^{\text{пар}}$  – наявна пропускна спроможність при паралельному графіку руху поїздів;

$n_{\text{пс}}^{\text{шв}}, n_{\text{пс}}, n_{\text{прм}}, n_{\text{пр}}, n_{\text{зб}}$  – кількість поїздів, відповідно, швидких пасажирських, пасажирських, приміських, прискорених вантажних та збірних;

$\varepsilon_{\text{пс}}^{\text{шв}}, \varepsilon_{\text{пс}}, \varepsilon_{\text{прм}}, \varepsilon_{\text{пр}}, \varepsilon_{\text{зб}}$  – коефіцієнти зняття вантажних поїздів, відповідно, швидкими пасажирськими, пасажирськими, приміськими, прискореними вантажними та збірними.

Визначена за виразом (2) величина являє собою максимальну кількість вантажних поїздів, які можна пропустити по дільниці. Однак, при пропуску різної кількості поїздів дільницею змінюються і умови їх пропуску. Проблеми використання виразу (2) в сучасних умовах описані в роботах [7, 8]. Методами імітаційного моделювання науковцями ДНУЗТ під керівництвом проф. В. І. Бобровського виконані дослідження [16], які показують, що зі зростанням ступеня заповнення пропускної спроможності двоколіїних ліній нелінійно зростають і витрати часу на перевезення. При перевезенні на однокільїних лініях залежність має кусково-нелінійний характер так, як різному рівню заповнення пропускної спроможності відповідають різні типи графіка руху поїздів. В роботі [5] методами

кореляційного аналізу досліджено показники роботи Укрзалізниці і встановлено зв'язок між обсягами перевезень та показниками використання рухомого складу. У зв'язку з цим величина  $N_v$  для окремої лінії у виразі (1) обмежена, а витрати  $E$  являють собою не постійну величину, а функціонально залежать від кількості вагонів  $N_v$ .

Переважає частина залізничної мережі України на сьогодні є малодіяльною. Тому основною задачею для умов України є не визначення пропускної спроможності мережі, а раціональний розподіл вагоно- та поїздопотоків на ній. Найпростіший варіант розподілу має місце в тому випадку, коли однотипний вагонопотік розподіляється на два напрямки. Вирішення задач такого типу представлено в роботах [2, 24]. За таких умов задача має одну змінну – кількість вагонів, що відправляється основним напрямком. Основна її складність пов'язана з формулюванням цільової функції. Задача вирішується методами прямого пошуку. Математична модель розподілу перевезень залізної руди та металургійної продукції між паралельними напрямками залізничної мережі представлена у роботі [28]. При цьому, однією з основних умов, що було висунуто в [28] при розв'язанні цієї задачі, є припущення про однотипний та взаємозамінний вантаж, що перевозиться на мережі. Таке припущення дозволило звести задачу до нелінійної транспортної задачі з обмеженнями пропускної спроможності. Запропонований в [28] метод забезпечує пошук розв'язку, який мінімізує витрати перевізника, однак при цьому не враховується його вплив на показники окремих користувачів транспортних послуг. В роботах [6, 24, 28] розглядається сучасний стан організації перевезень на залізничному транспорті України, коли ринок залізничних перевезень є монополізованим, а тарифи на перевезення встановлює держава. В цих умовах застосування запропонованих методів стикається з проблемами організаційного характеру. Тарифи на залізничні перевезення в Україні повинні встановлюватися на підставі напряму руху вагонопотоків, наведеного у плані формування поїздів. Однак структура надання інформації в плані формування не передбачає можливості варіантних маршрутів прямування вагонопотоків. Також сучасна методика побудови плану формування поїздів та тарифів на послуги залізничного транспорту не розкриває порядку дій у випадку, коли додаткові обсяги перевезень вимагають відправлення вагонопотоків за більш вартісними маршрутами після оприлюднення тарифів.

Глобалізаційні процеси, що відбуваються у світі, призвели до суттєвого збільшення обсягів міжнародних залізничних перевезень. При цьому, залізничні адміністрації зацікавлені у збільшенні обсягу транзитних перевезень та отриманні доходів від експорту транспортних послуг. Як результат, кожна із транзитних адміністрацій вирішує задачу встановлення тарифів на залізничні перевезення її територією для отримання максимального доходу із урахуванням рішень інших залізничних адміністрацій, розташованих послідовно на маршруті перевезення та на паралельних маршрутах. Задача розподілу вантажопотоків на міжнародній залізничній мережі розглянута у роботі [20]. Поведінка залізничних адміністрацій, що конкурують між собою, за вантажопотоки в [20] досліджується методами теорії ігор.

Після ринкових реформ на залізничному транспорті країн Північної Америки тарифи на їх послуги є договірними і встановлюються ринком. В роботі [25] розглянута проблема розподілу пропускної спроможності інфраструктури залізниці 1-го класу між п'ятьма її перевізними підрозділами, спеціалізованими за видами послуг, та пасажирським перевізником. В процесі вирішення задачі в [25] розглянуто два підходи до виконання розподілу: за умови централізованого та децентралізованого управління залізницею. Оцінка ефективності плану розподілу здійснюється за критеріями величини затримок поїздів та суми платежів за доступ до інфраструктури. При централізованому управлінні задача вирішується з позиції досягнення системного мінімуму затримки поїздів. При цьому узгодження графіку руху поїздів різних підрозділів зводиться до вирішення оптимізаційної задачі нелінійного програмування. При децентралізованому управлінні розглядається трьохетапна гра між адміністрацією залізниці та її підрозділами. Етап 1 полягає у оголошенні адміністрацією залізниці попередньої вартості доступу до інфраструктури та подачі перевізними підрозділами пропозицій щодо прокладання їх поїздів на графіку руху. Етап 2 полягає у аналізі адміністрацією наданих пропозицій і встановленні тарифів на доступ до інфраструктури з урахуванням рівня її завантаження. Етап 3 полягає у перегляді перевізними підрозділами своїх пропозицій з урахуванням величини прогнозних затримок та вартості доступу до інфраструктури.

Дослідження взаємодії між менеджером інфраструктури та перевізниками на залізницях Австралії виконано у роботі [27]. В дослідженні розглянуто розгалужену залізничну мережу, що

використовується двома перевізними компаніями для перевезення вугілля. Взаємодію між менеджером інфраструктури та перевізниками при розподілі пропускної спроможності формалізовано з використанням методів теорії ігор.

Характерною особливістю сучасного етапу розвитку залізничного транспорту в Європейському Союзі є демонополізація ринку залізничних перевезень та впровадження конкуренції в його різноманітних секторах. При цьому, в Європейському Союзі в якості основної моделі організації ринку залізничних перевезень прийнято модель вертикального розділення, коли утримання та експлуатацію залізничної інфраструктури здійснює менеджер інфраструктури, а безпосередньо з вантажовласниками взаємодіють конкуруючі між собою підприємства-перевізники. Принципи побудови такого ринку перевезень описані в Директиві 2012/34/EU [19], а її основною вимогою є забезпечення рівноправного та недискримінаційного доступу перевізників до залізничної інфраструктури. Як результат, виникає задача розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури між різними перевізниками. Пропозицію, стосовно послуг інфраструктури згідно з [19] формує менеджер інфраструктури у вигляді правил користування залізничною мережею. Вимоги до опису залізничної інфраструктури викладені в [10, 18]. Принципи адаптації вимог [18, 19] до вітчизняних умов викладені в [10]. В якості формальної моделі залізничної інфраструктури в [4] запропоновано використовувати зважений орієнтований граф вершинами якого є характерні пункти на мережі (роздільні пункти, пункти примикання суміжних мереж та ін.), а дугами – ділянки колії, що з'єднують вершини мережі. Також у [10] розроблено структуру бази даних для збереження інформації про залізничну мережу. Представлена у [10] графова модель може забезпечити вихідними даними вирішення задачі про розподіл пропускної спроможності залізниць між перевізниками.

В процесі розподілу пропускної спроможності інфраструктури приймають участь менеджер інфраструктури та перевізники, що є окремими суб'єктами господарювання та мають свої власні цілі. Метою менеджера інфраструктури є отримання максимального доходів від наданих послуг інфраструктури. Метою перевізників є пропуск своїх поїздів по маршрутам, які мінімізують загальну вартість послуг інфраструктури, та відповідно, максимізують їх дохід. Очевидно, що цілі вказаних суб'єктів є суперечливими між собою та потребують узгодження.

Проблема розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури між перевізниками розглянута в роботі [1]. Дослідження обсягів перевезення вантажів та пасажирів в [1] показує їх суттєву нерівномірність. У зв'язку з цим пропускна спроможність залізничної інфраструктури для конкретного виду перевезення також буде являти випадкову величину. Автори пропонують встановити систему пріоритетів для пропуску поїздів різних категорій, прогнозувати обсяги перевезення з використанням системи нечіткого виведення та реалізовувати нитки графіка у вільному продажі. Проблемаю такого підходу є те, що його можливо реалізувати лише в межах окремих ділянок. Переважна частина перевезень на мережі здійснюється в межах декількох ділянок, при цьому перевантажені ділянки можуть входити до різних маршрутів руху поїздів різних перевізників.

Відповідно до Директиви 2012/34/EU [19] менеджер інфраструктури повинен надавати послуги мінімального пакету доступу (до яких відноситься і пропуск поїздів головними коліями) за ціною що відповідає собівартості перевезень збільшеної на величину розумного доходу. В той же час при обмеженні пропускної спроможності вартість послуги може збільшуватись на величину, що відображає дефіцит пропускної спроможності інфраструктури. Обсяги перевезень, які повинні виконувати перевізники на замовлення відправників не є постійними, а змінюються у часі відповідно до потреб ринку та інших факторів. Для урахування коливань у обсягах перевезень Директивою 2012/34/EU передбачена можливість виділення у графіку руху наступних «ниток»:

- постійних поїздів, що включені до графіку руху і відправляються з частотою не рідше ніж один раз на тиждень;

- додаткових поїздів («ad hoc train»), що призначаються за потребою.

Відповідно до [30] частка більш дорогих ниток «ad hoc train», що виділяються в графіках при перевезеннях у Європейському Союзі, складає біля 40%. Це вказує на той факт, що ефект від попереднього планування перевезень в умовах випадкового потоку заявок на них не завжди забезпечує зниження логістичних витрат на них. В таких умовах для окремого перевізника виникає задача вибору способу виконання перевезення: поїздом постійного розкладу за більш дешевою ціною, але з ризиком втрати частини ниток, або більш дорогим поїздом, що призначається за потребою.

Поява внутрішньої конкуренції створила потребу у розробці наукових методів для аналізу поведінки учасників ринку залізничних перевезень у Європейському Союзі. В якості математичних методів для дослідження вказаної проблеми широко використовуються методи теорії ігор. Зокрема в роботі [21] розглядається гра в якій приймають участь державний регулятор, менеджер інфраструктури, перевізники та споживачі транспортних послуг. Гра реалізується у два етапи:

– регулятор встановлює плату за доступ до інфраструктури таким чином, щоб максимізувати соціальний добробут та забезпечити беззбитковість менеджера інфраструктури;

– перевізники в умовах конкурентної боротьби замовляють послуги з доступу до неї з метою максимізації власних прибутків.

Розроблена у [21] модель використана для дослідження ефективності впровадження одноставкових та двоставкових тарифів на послуги залізничної інфраструктури.

Таким чином, виконаний аналіз наукових джерел показує, що проблема розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі досить давно є у полі зору науковців та практиків залізничної галузі, однак до теперішнього часу ця проблема остаточно не вирішена. Узагальнений аналіз задач дослідження та методів, що використовуються для їх вирішення наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Задачі та методи досліджень розподілу вантажопотоків на залізничній мережі**

Задача дослідження	Методи дослідження	Роботи
Моделювання структури залізничної транспортної мережі та вагонопотоків у ній	Теорія графів	[4], [20]
Визначення пропускної спроможності елементів залізничної мережі	Теорія експлуатації залізниці	[6], [9], 12, 13, 14, 15, 17, 22, 23, 26, 29
	Теорія експлуатації залізниці, імітаційне моделювання	[16]
	Кореляційний аналіз	[5]
Визначення витрат на перевезення	Економіко-математичний аналіз, теорія експлуатації залізниці	[2, 16, 28]
Розподіл вагонопотоків на залізничній мережі	Порівняння варіантів	[2]
	Лінійне та нелінійне програмування	[3], [28]
	Адаптивне управління на основі нейронних мереж	[1]
Моделювання поведінки учасників перевізного процесу	Теорія ігор	[20], [21], [25], [27]

Залізнична мережа України є складною і має значну кількість паралельних маршрутів; при цьому лише частина дільниць на ній є перевантаженими. Маршрути пропуску конкретних вагонопотоків на мережі можуть містити різну долю перевантажених дільниць. У зв'язку з цим додаткового дослідження вимагає задача визначення критерію рівноправного доступу до перевантажених дільниць на залізничній мережі, розподілу вагонопотоків на мережі в умовах обмеження пропускної спроможності дільниць та тарифікації послуг з перевезення. Ефективними інструментами дослідження при цьому є методи дослідження операцій, економіко-математичного моделювання та теорії експлуатації залізниць. Перевезення в умовах коливання обсягів вантажопотоків може здійснюватися поїздами постійного розкладу та поїздами на замовлення. Вимагає додаткового дослідження проблема

розподілу вагонопотоків на мережі при впровадженні плати за виділення нитки графіка для поїздів постійного графіку та підвищеного тарифу для поїздів на замовлення. При цьому обсяги вантажопотоків на мережі можуть моделюватись за допомогою методів теорії імовірностей, а поведінка окремих учасників перевізного процесу – за допомогою методів теорії ігор.

### **Наукова новизна та практична значимість**

Наукова новизна полягає у критичному аналізі та узагальненні сучасних методів, що використовуються для вирішення проблеми розподілу вантажопотоків на залізничній мережі.

Практична значимість результатів полягає в тому, що вони вказують на невідповідність методів, які практично використовуються на залізничному транспорті України для розподілу

вагонопотоків, сучасним умовам експлуатації залізничного транспорту. Встановлено наукові методи, що дозволяють удосконалити підходи до вирішення задачі з метою урахування інтересів різних учасників перевідного процесу.

### Висновки

1. Розподіл вагонопотоків на мережі залізниць є одним із етапів розробки плану формування поїздів. Актуальність вирішення цієї проблеми для залізниць України пов'язана з наявністю на ній перевантажених ділянок, особливо у напрямку морських портів. Методи вирішення цієї задачі, що використовуються наразі в практичній роботі залізничного транспорту, склалися за часів планової державної економіки. Вони ґрунтуються на вирішенні однокритеріальної задачі оптимізації, спрямованої на пошук такого розподілу вагонопотоків на мережі, що мінімізує собівартість перевезень для залізниці. Такий підхід не враховує наявності різних цілей у незалежних один від одного учасників перевізного процесу: залізниці, операторів вагонів, вантажовласників, а в подальшому перевізників. Тому цей підхід вимагає удосконалення.

2. В процесі аналізу встановлено задачі та наукові методи, що використовуються в сучасних умовах при дослідженні проблеми розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі. Встановлено, що основним методом моделювання структури залізничної транспортної мережі та обсягів вагонопотоків є теорія графів; визначення пропускної спроможності елементів залізничної мережі здійснюється методами теорії експлуатації залізниць, імітаційного моделювання та кореляційного аналізу; визначення оптимального розподілу пропускної спроможності здійснюється шляхом порівняння конкуруючих варіантів, а також методами лінійного та нелінійного програмування, методами адаптивного управління із застосуванням нейронних мереж; поведінка учасників процесу перевезень під час розподілу пропускної спроможності досліджується методами теорії ігор.

3. Виконаний аналіз літературних джерел показує, що проблема розподілу вантажних вагонопотоків на залізничній мережі досить давно є у предметом дослідження науковців та практиків залізничної галузі, однак до теперішнього часу ця проблема остаточно не вирішена. Встановлено, що в сучасних умовах додаткового дослідження вимагає задача визначення критерію рівноправного доступу до перевантажених ділянок на розгалуженій залізничній мережі та задача розподілу вагонопотоків на мережі в

умовах коливання вагонопотоків при перевезеннях постійними поїздами та поїздами на замовлення.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бутько Т. В., Харланова С. В., Коваленко М. В. Формалізація процедури розподілу пропускної спроможності залізничної мережі в умовах недискримінаційного доступу до інфраструктури. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27. № 2. С. 3-10. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt\\_2022\\_2\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2022_2_2) (дата звернення: 21.09.2024).
2. Вернигора Р. В., Папахов О. Ю., Логвінова Н. О. Аналіз залізничної інфраструктури з паралельними ходами напрямку Знамянка–Одеса. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. № 42. С. 74–79. – DOI: 10.15802/stp2012/9285.
3. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України. Чинний від: 2004-12-29. Київ : ТОВ «Швидкий рух», 2005. 100 с.
4. Козаченко Д. М., Березовий М. І., Санницький Н. М. Формалізація опису залізничної інфраструктури. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2015. № 9. С. 23–28. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2015/49350>. (дата звернення: 21.09.2024).
5. Кравченко М. А., Стебницька Є. М., Прохорченко А. В., Киман А. М., Кірієнков А. Є. Дослідження стабільності руху поїздотоків на вантажонапруженому залізничному полігоні. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. № 199. С. 99-113. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/9576> (дата звернення: 21.09.2024).
6. Папахов О. Ю., О कोरोков А. М., Логвінов О. М. Зміна розрахункових складових для оперативного розподілу вагонопотоків на мережі залізниць. *Вісник ДНУЗТ*. 2007. № 17. С. 162-164. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2007/17610> (дата звернення: 21.09.2024).
7. Прохорченко А. В., Петренко В. Г. Дослідження пропускної спроможності залізничної інфраструктури з позиції теорії транспортних потоків. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. № 145. С. 88-95. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.145.2014.80971> (дата звернення: 21.09.2024).
8. Прохорченко А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 36-41. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/9370/1/Prokhorchenko.pdf> (дата звернення: 21.09.2024).
9. ЦД 0036. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : наказ Укрзалізниці від 14.03.2001 р. № 143/Ц. Київ : Транспорт України, 2002. 376 с.

10. Пшінко О. М., Мямлін С. В., Козаченко Д. М., Алейнік В. С., Тревогін І. І. Дослідження вимог Європейського Союзу щодо опису залізничної інфраструктури. *Українські залізниці*. 2015. № 5-6 (23-24). С. 46–51. URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/3955> (дата звернення: 21.09.2024).

11. ЦД-0079. Практичний посібник з упровадження технологічно-економічної моделі перевізного процесу : затв. Наказ Укрзалізниці 17.12.08 №550-Ц. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2009. - 270 с.

12. UIC, Capacity (UIC code 406). 2004, International Union of Railways (UIC): Paris, France

13. Armstrong J., & Preston J. Capacity utilisation and performance at railway stations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. № 7(3). P. 187-205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.08.003> (дата звернення: 21.09.2024).

14. Azadi Moghaddam Arani A., Jolai F., & Nasiri M. M. A multi-commodity network flow model for railway capacity optimization in case of line blockage. *International Journal of Rail Transportation*. 2019. № 7(4). P. 297–320. URL: <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1571450> (дата звернення: 21.09.2024).

15. Bešinović N. & Goverde R. M. P. Capacity assessment in railway networks. *Handbook of Optimization in the Railway Industry*. 2018. №268. P. 25-45. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72153-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72153-8_2) (дата звернення: 21.09.2024).

16. Bobrovskiy V. I., Korobyova R. G. & Balanov V. O. Simulation model for evaluating the carrying capacity of railways. *Science and Transport Progress*. 2019. № 6(78). P. 16-27. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154819> (дата звернення: 21.09.2024).

17. Dick C. T., Mussanov D. & Nishio N. Transitioning from Flexible to Structured Heavy Haul Operations to Expand the Capacity of Single-Track Shared Corridors in North America. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. № 233(6). P. 629–639. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409718804427> (дата звернення: 21.09.2024).

18. Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community (Recast). URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/57/oj> (дата звернення: 21.09.2024).

19. Directive 2012/34/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012 establishing a single European railway area (recast). URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj> (дата звернення: 21.09.2024).

20. Kozachenko D., Skalozub V., Gera B., Hermaniuk Yu., Korobiova R., & Gorbova A. A model of transit freight distribution on a railway network. *Transport Problems*. 2019. № 14(3). P. 17-26. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.3.2> (дата звернення: 21.09.2024).

21. Lang M., Laperrouza M. & Finger, M. Competition Effects in a Liberalized Railway Market.

*Journal of Industry, Competition and Trade*. 2013. №13(3). P. 375–398. DOI:10.1007/s10842-011-0117-2.

22. Lindner T. Applicability of the analytical UIC Code 406 compression method for evaluating line and station capacity. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2011. 1(1). P. 49-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.09.002> (дата звернення: 21.09.2024).

23. Melody Khadem Sameni, Arash Moradi, Railway capacity: A review of analysis methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. № 24. P. 100357. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100357> (дата звернення: 21.09.2024).

24. Nesterenko G. I., Chibisov Yu. V. Optimal route selection when distributing the freight trainflow in the railway junction with the consideration of the level of the traffic capacity saturation. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2012. №3 [174]. – С. 138-143.

25. Patrick T. Harker, Sungwook Hong. Pricing of track time in railroad operations: An internal market approach. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1994. № 28 (3). P. 197-212. URL: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90007-8) (дата звернення: 21.09.2024).

26. Pouryousef H., Lautala P. & White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*. 2015. № 23. P. 30-42. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0069-z> (дата звернення: 21.09.2024).

27. Savelsbergh M., & Talebian M. Cost allocation under competition: a new rail access charging policy. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. 2018. №8(5). P. 511-534. URL: <https://doi.org/10.1007/s13676-018-0133-z> (дата звернення: 21.09.2024).

28. Vernigora R. V., Papakhov O. Y. & Logvinova, N. O. Mathematical model of transportation of raw material and finished products of mining and metallurgical enterprises by railway directions with parallel motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2013. № 3. P. 93-102. URL: <https://nvnngu.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/45-03/733-2013-3-vernigora/0> (дата звернення: 21.09.2024).

29. Weik N., Warg J., Johansson I., Bohlin M., Nieben N. Extending UIC 406-based capacity analysis – New approaches for railway nodes and network effects. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020. № 15. P. 100199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100199> (дата звернення: 21.09.2024).

30. Zitricky V., Cerna L. & Abramovic B. The Proposal for the Allocation of Capacity for International Railway Transport. *Procedia Engineering*. 2017. № 192. P. 994-999. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.171> (дата звернення: 21.09.2024).

Надійшла до редколегії 16.07.2024.  
Прийнята до друку 25.08.2024.



## PROBLEMS OF FREIGHT CAR FLOWS DISTRIBUTION ON RAILWAY NETWORKS

**Purpose.** The purpose of the article is a critical analysis of the existing methods of freight car flows distribution on the railway network and the determination of the directions of these methods adaptation to the operating conditions of the Ukrainian railway transport. **Methodology.** The research was carried out on the basis of the processing of literary sources in the scientometric databases Scopus and Google Scholar. **Results.** The distribution of car flows on the railway network is one of the stages of developing a plan for the trains formation. The methods of solving this problem, which are currently used in the practical work of railway transport, were developed during the time of the planned state economy. They are based on the solution of a single-criterion optimization problem aimed at finding such a distribution of car flows on the network that minimizes the cost of transportation for the railway. Reforming the railway transport market with the aim of introducing competition requires the complication of methods of solving the problem of distribution of car flows to take into account the conflicting goals of independent participants in the transport process. The conducted studies showed that the main method of modeling the structure of the railway transport network and the volumes of car flows in it is the theory of graphs; determination of the carrying capacity of elements of the railway network is carried out by the methods of the theory of railway operation, simulation modeling and correlation analysis; determination of the optimal distribution of bandwidth is carried out by comparing competing options, as well as by linear and non-linear programming methods, adaptive control methods using neural networks; the behavior of participants in the transportation process during the allocation of bandwidth is investigated by game theory methods. It has been established that in modern conditions, the task of determining the criterion of equal access to congested sections on the branched railway network and the task of distributing car flows on the network in conditions of fluctuating car flows during transportation by regular trains and trains to order require additional research. **Originality.** The scientific novelty of the work consists in the critical analysis and generalization of modern methods used to solve the problem of distribution freight car flows distribution on railway networks. **Practical value.** The practical significance of the results lies in determining the inconsistency of the methods that are practically used on the railways of Ukraine for the distribution of car flows, with the modern conditions of operation of railway transport. Scientific methods have been established that allow to improve approaches to solving the problem of rational distribution of car flows, taking into account the interests of various participants in the transportation process.

*Keywords:* railway transport, freight transportation, capacity, cars flow, optimization