

УДК 656.224.225

М. Б. КУРГАН<sup>1\*</sup>, С. Ю. БАЙДАК<sup>2\*</sup>, М. А. ГУСАК<sup>3\*</sup>, Р. Б. НОВІК<sup>4\*</sup>,  
Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 453 10 49, ел. пошта m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup> Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта s.y.baidak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-7909-8527

<sup>3\*</sup> Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта m.a.husak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-8187-7792

<sup>4\*</sup> Каф. Військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта r.b.novik@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2571-6641

<sup>5\*</sup> Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта n.p.hmelevska@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2360-8671

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ І ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА НАПРЯМКАХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ ХОДАМИ

**Мета.** Метою роботи є визначення заходів для підвищення логістичних операцій при спеціалізації напрямків для вантажних і пасажирських перевезень шляхом передачі частини транзитного вантажопотоку на паралельні ходи. Вирішення задачі вибору раціонального розподілу вантажних і пасажирських перевезень залежно від спеціалізації напрямків дозволить оптимізувати використання пропускової й провізної спроможності та інвестицій у розвиток інфраструктури. **Методика.** Оптимізація транспортного процесу під час змішаних перевезень передбачає можливість відокремлення вантажного руху від пасажирського. Запропонована методика передбачає вирішення задачі вибору раціонального розподілу вантажних і пасажирських перевезень залежно від спеціалізації напрямків. Ідея такого розмежування базується на тому, що на мережі залізниць можна виділити станції, між якими існує декілька паралельних маршрутів курсування поїздів. Дослідження виконано на мережі залізниць, що зв'язує Львів і Київ. При вирішенні задачі розглядалися різні показники: довжина маршруту, час руху, механічна робота локомотива, навантаження на колію та інші. Крім того враховувалися граничні умови: обсяги пасажирообігу, вантажообігу, пропускна спроможність ділянок й допустима швидкість руху поїздів. **Результати.** Розроблено математичну модель перерозподілу поїздопотоків на мережі залізниць, що забезпечує раціональну роботу залізничної колії при мінімальних витратах на реконструкцію залізниць. **Наукова новизна.** Встановлено, що у випадку розділення руху, терміни проведення ремонтів можуть бути іншими через меншу інтенсивність руху, що дозволяє зосередитись на конкретних видах ремонтних робіт, а не на всіх видах робіт одночасно. Хоча загальні принципи періодичності ремонтів можуть залишатися тими ж у обох випадках, схеми періодичності можуть відрізнятися в залежності від багатьох факторів, зокрема, інтенсивності експлуатації, технічного стану транспорту, термінів проведення ремонтів та наявності спеціалізованого персоналу. **Практична значимість.** Із застосуванням запропонованих авторами нових підходів до вирішення поставлених завдань встановлені схеми раціонального розподілу вантажних і пасажирських перевезень на замкнених полігонах регіональних філій Південно-Західної й Львівської залізниць що дозволить визначити заходи для підвищення логістичних операцій та зменшити експлуатаційні витрати на перевезення вантажів і пасажирів.

**Ключові слова:** залізничні перевезення, спеціалізація напрямків, розподіл перевезень, вантажопотік, логістика, рухомий склад, експлуатаційні витрати, оптимізація

### Вступ

Мережа українських залізниць є однією з найбільш розвинутих серед європейських країн, і за довжиною залізничних колій Україна посідає четверте місце в Європі і тринадцяте – у світі (експлуатаційна довжина – 19,8 тис. км). Українські залізниці відіграють важливу роль у реалізації транзитного потенціалу України. Близько 83% від загальної кількості перевезень вантажів

здійснюється залізницями України.

Мережа залізниць України характеризується наявністю паралельних напрямків перевезень з різною завантаженістю, по якій переміщуються поїздопотіки. Інфраструктура залізничних напрямків з паралельними ходами має різне технічне забезпечення (вид тяги, параметри плану й поздовжнього профілю, наявність бар'єрних місць та обмежень швидкості при русі по ним,

кількість головних колій на перегонах тощо).

Оптимізація транспортного процесу під час змішаних перевезень передбачає можливість відокремлення вантажного руху від пасажирського. Ідея такого розмежування базується на тому, що на мережі залізниць можна виділити станції, між якими існує декілька паралельних маршрутів курсування поїздів. В зв'язку з цим, зростає актуальність проблеми визначення раціональних параметрів пропуску поїздопотоків на залізничних напрямках з паралельними ходами з метою зменшення експлуатаційних витрат залізниць.

«Укрзалізниця» перетворилась на найважливішу логістичну компанію країни. Однак, її можливості щодо вивезення експортної продукції обмежені як фізичним браком прикордонної інфраструктури на сьогодні, так і бойовими діями – зокрема, ракетними ударами по залізничній інфраструктурі. Тому зараз середньодобове навантаження «Укрзалізниця» становить 40% від довоєнного рівня.

Основними завданнями, які стоять перед транспортною логістикою, є оптимізація транспортного процесу під час змішаних перевезень, визначення раціональних маршрутів доставки, підвищення рівня організації перевезень та управління логістичними системами. Вирішенню окремих питань окресленої проблеми присвячено цю статтю.

### **Постановка завдання дослідження**

Спеціалізація напрямків для вантажних і пасажирських перевезень шляхом передачі частини транзитного вантажопотоку на паралельні ходи передбачає можливість відокремлення вантажного руху від пасажирського. Дослідження виконано на мережі залізниць, що поєднує Київ зі Львовом. При вирішенні задачі необхідно було розглянути й оцінити різні показники: довжина маршруту, час руху, механічна робота локомотива, навантаження на колію та інші. Крім того врахуванню підлягають такі граничні умови як обсяги пасажиро- і вантажообігу, кількість головних колій, пропускна спроможність ділянок й допустима швидкість руху поїздів. Завданням дослідження є розробка математичної моделі перерозподілу поїздопотоків на мережі залізниць при мінімальних витратах на реконструкцію паралельних напрямків. Як приклад, пропонується розглянути варіант раціонального розподілу вантажних і пасажирських перевезень на замкнених полігонах регіональних філій Південно-Західної й Львівської залізниць, а також визначити заходи з підвищення логістичних операцій при спеціалізації напрямків для

вантажних і пасажирських перевезень шляхом передачі частини транзитного вантажопотоку на паралельні ходи і дослідити можливості зменшення експлуатаційних витрат на перевезення.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є визначення заходів для підвищення логістичних операцій при спеціалізації напрямків для вантажних і пасажирських перевезень шляхом передачі частини транзитного вантажопотоку на паралельні ходи. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлено й вирішено наступні задачі:

- провести аналіз наявних методів організації руху поїздів на транспортній інфраструктурі з паралельними залізничними напрямками;

- встановити зв'язок між параметри руху поїздів та пропускною спроможністю залізничних напрямків з паралельними ходами;

- створити математичну модель і розробити методику експлуатаційної роботи залізничного напрямку з паралельними ходами;

- встановити критерії та процедуру оцінки ефективності рішення щодо розподілу вантажних і пасажирських поїздів за напрямками з паралельними ходами.

Враховуючи вище викладене, виникла потреба дослідити ефективність розмежування вантажних і пасажирських перевезень в комплексі, виходячи з вимог скорочення термінів доставки вантажів і пасажирів за умови забезпечення встановлених обсягів перевезень.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналіз сучасних публікацій показує, що дослідження з вибору пріоритетних напрямків міжнародних перевезень включають широкий спектр питань, основними з них є обґрунтування логістичних схем перевезень і термінів доставки вантажів і пасажирів. Завдяки своєму географічному розташуванню та розвиненій транспортній інфраструктурі Україна має значний потенціал у розвитку вантажних перевезень, насамперед у міжнародних перевезеннях, зокрема як країна-транзістор у логістичному ланцюгу торгівлі між Азією та Європою [1]. Дослідження [2] включає проблеми прийняття рішень, з якими стикаються менеджери залізнично-транспортної інфраструктури в мережах залізничних доріг з виділеними коліями та коридорами загального користування. Аналізується стратегія консолідації коридорів, де колія обслуговує пасажирські та вантажні поїзди. Задаються різні характеристики пасажирських та вантажних поїздів та аналітично визначається оптимальний розподіл

колій та часу консолідації, використовуючи дві різні структури моделей. У експериментах використовуються реалістичні параметри, засновані на голландській залізничній системі. Оптимізований метод вибору маршруту поїзда для повсякденного планування вантажних поїздів запропоновано в роботі [3]. Суміщений рух поїздів на одних і тих же коліях прямо або опосередковано впливає на проектування, будівництво, експлуатацію та технічне обслуговування залізничної системи. У цьому контексті в статті [4] якісно і кількісно оцінюється вплив деяких з перерахованих характеристик на компоненти залізничної системи і наводяться елементи витрат на будівництво залізничної інфраструктури з урахуванням різних сценаріїв експлуатації.

Вибір оптимального транспортного рішення включає обґрунтування найбільш вигідних маршрутів, вибір рухомого складу відповідно до виду вантажів, режиму перевезення вантажів (при якому поетапно використовуються різні види транспорту), технологію прикордонних станцій тощо. Такі питання розглянуті в роботах [5, 6]

В роботі [7] запропоновано моделі прийняття рішень щодо оцінки ефективності транспортної системи Європа-Азія, а в роботі [8] запропонована модель розподілу транзитних вантажів на залізничній мережі в умовах конкуренції за обсяги вантажоперевезень залізничним транспортом.

У статті [9] представлені теоретичні основи й емпіричні результати аналізу і моделювання транспортних мереж в Польщі з використанням складних мереж. Описано властивості складних мереж (Scale Free і Small World) і характерні для мережі характеристики. В роботах [10, 11] описано імітаційну модель транспортної системи Польщі як інструмент сталого розвитку транспорту.

Методи дослідження та рішення поточних транспортних проблем розглядалися на Міжнародній науковій конференції Транспорт ХХІ століття, 9–12 червня 2019 р., Рин, Польща [12].

Більшість європейських країн протягом більше трьох десятиліть успішно вирішують проблему національних пасажиропотоків на основі істотного збільшення швидкості руху поїздів на спеціально побудованих лініях. В статті [13] наведені основні відмінності залізничної інфраструктури України і Європейських країн. Показано, що міжнародні перевезення територією України мають певні особливості. Зміна стандартів залізничної колії на кордоні з країнами Європи змушує шукати найбільш раціональні

маршрути перевезення вантажів (з урахуванням відстані, технічного стану, швидкості доставки та інших параметрів міжнародних транспортних коридорів) та раціональних технологій переміщення вантажів у прикордонних пунктах, які дозволяють вивести ці перевезення на інноваційний шлях розвитку.

В роботі [14] досліджено режим руху комбінованих різношвидкісних вантажних поїздів з розподілом пасажирського і вантажного транспорту.

При вирішенні завдань щодо підвищення пропускної й провізної спроможності залізничної розглядається як цілісна система, що складається з пристроїв та конструкцій, які через недосконалий технічний стан можуть обмежувати швидкість руху поїздів на тій чи іншій ділянці. Тому виникає необхідність по кожному бар'єрному місцю на залізниці знати швидкість руху поїздів, що допускається, а також параметри пристроїв, під які необхідно перевлаштувати залізницю, щоб реалізувати ці швидкості. Так, в роботі [15] запропонована методологія, яка дозволяє оцінювати пропускну спроможність і рівень використання залізничних систем у різних географічних масштабах і відповідно до наявності даних. Отримані результати можуть надати цінну інформацію для забезпечення ефективної експлуатації та використання залізничної інфраструктури, що враховує пріоритетність інвестицій, плату за перевезення та доступ до інфраструктури і дозволяє мінімізувати витрати для користувачів.

У світі існують транспортні коридори з високим рівнем використання різного роду перевезень: міжміські пасажирські, приміські, вантажні та навіть високошвидкісні пасажирські, що працюють на одних коліях. В статті [16] використовуються результати понад 50 попередніх досліджень виконаних в США та Європі, щоб описати різні підходи до визначення пропускної спроможності залізниці, а потім класифікувати їх на основі кожного: аналітичні методи, методи моделювання й комбінований.

Зростаючий попит на пасажирські та вантажні перевезення в поєднанні з обмеженими капітальними вкладеннями для розширення залізничної інфраструктури Сполучених Штатів (США) потребує більш ефективного використання поточної потужності ліній. Американська Інженерно-технічна асоціація (AREMA) пропонує спрощений підхід до оцінки пропускної здатності лінії який оцінює практичний потенціал шляхом множення теоретичної пропускної спроможності на ефективність диспетчеризації

лінії. Метод AREMA для розрахунку теоретичної потужності та ефективності диспетчеризації вимагає врахування різних факторів, таких як кількість колій, правила експлуатаційної роботи, характеристики траси, специфікацію поїздів (тип поїзда, довжина, маса), а також системи сигналізації та керування поїздами [16].

Для відправлень на відстань 500-1500 км більше підходить залізничний режим більш дешевих транспортних витрат і більш швидких термінів доставки. Тому поточна логістична проблема полягає в тому, як оптимізувати використання залізниць. Так, в роботі [17] відмічається, що у британській залізничній мережі за останні 20 років спостерігалось значне зростання вантажних і пасажирських перевезень, що викликає побоювання з приводу її здатності абсорбувати тривале зростання. Був реалізований ряд інфраструктурних ініціатив, спрямованих на збільшення пропускної спроможності і зменшення конфліктів. Досліджено вплив на експлуатаційні характеристики вантажних поїздів нової залізничної інфраструктури для розподілу пасажирських і вантажних перевезень. Неоднорідність в поєднанні характеристик різних типів поїздів призводить до великих затримок, ніж при однорідному русі. Аналіз, наведений в роботі [18], включав вплив на затримку різних транспортних засобів і характеристик поїздів.

Північноамериканські залізниці відчувають зростання попиту на перевезення і все частіше потребують збільшення пропускної спроможності своїх ліній; це зажадає зміни режиму роботи та інфраструктури. В роботі [19] показано, що розширення інфраструктури вимагає тривалого часу і капіталомістких операцій. В якості альтернативи, деяка додаткова потужність може бути досягнута шляхом зміни режиму експлуатаційної роботи, що часто дешевше і швидше в реалізації.

Реалізація масштабних інвестиційних проєктів (нове будівництво, реконструкція залізниць), які передбачають високі інвестиційні витрати та необхідність врахування великої кількості факторів, вимагає використання відповідних методів оцінки ефективності. Основою для оцінки ефективності проєкту є такі принципи: розгляд варіанту (проєкту) протягом всього розрахункового періоду, позитив і максимальний ефект, врахування фактору часу, вплив інфляції, невизначеності, ризику тощо. Попередня оцінка ґрунтується на методах [20-22].

Багаторічними дослідженнями встановлено,

що найменші експлуатаційні витрати з утримання залізничної колії будуть забезпечені при відповідному співвідношенні інтенсивності навантаження колії, рівня динамічного навантаження на колію від рухомого складу та потужності залізничної колії [23]. Цей принцип використано в нормативних документах Укрзалізниці. Так, наприклад, категорія залізничної колії встановлюється в залежності від вантажонапруженості та від встановленої швидкості пасажирських і вантажних поїздів. Тобто інтенсивність навантаження колії визначена вантажонапруженістю, а рівень динамічного навантаження на колію від рухомого складу - встановленою швидкістю поїздів.

У посібнику [24] надана оцінка витрат на утримання змішаних високошвидкісних пасажирських і вантажних залізничних коридорів. Відмічається, що експлуатація у змішаному русі (тобто з вантажними та приміськими поїздами) зазвичай відбувається значно нижче максимальної швидкості.

Перешкодою до переходу на інноваційний шлях розвитку в Україні стала класична форма організації руху, яка полягає у використанні інфраструктури в перевезенні як пасажирів, так і вантажів (змішаний рух). Недоліки організації такого руху – недостатній комфорт пасажирів та неможливість застосування нового прогресивного рухомого складу. При переключенні поїздопотоків на паралельні ходи, змінюється інтенсивність руху вантажних і пасажирських поїздів та інші експлуатаційні показники, що впливають на напружено-деформований стан колії, а отже на витрати, пов'язані з ремонтом і утриманням колії.

В статті [25] досліджуються питання функціонування залізничних вантажних коридорів у Словацькій Республіці та використання їх пропускної здатності при суміщеному русі пасажирських і вантажних поїздів. Автори вважають, що спільна робота (пасажирська та вантажна) на коридорах може спричинити велике споживання місткості залізничної інфраструктури. Отже, управління вантажними коридорами має включати процедури розподілу пропускної здатності інфраструктури для міжнародних вантажних поїздів, що курсують такими коридорами.

Перші кроки в цьому напрямку зроблені й в Україні: розроблена програма, відповідно до якої вантажопотоки повинні рівномірно розподілятися по всім напрямкам, а не зосереджуватись на найбільш вантажонапружених залізничних лініях, наприклад, таких, як Київ-Дніпро. З

цією метою приводяться в належний стан друго-рядні, поки-що мало задіяні ходи, на які можна буде переключати вантажопотоки. Одночасно виникає ряд проблем експлуатаційного і технічного характеру, зв'язаних із співвідношенням швидкостей вантажних і пасажирських поїздів, зменшенням провізної спроможності залізниць, на яких впроваджується швидкісний рух [26].

Ґрунтуючись на результатах зарубіжних і вітчизняних наукових розробок намічені шляхи вирішення проблеми, що стосується спеціалізації напрямків для вантажних і пасажирських перевезень шляхом передачі частини транзитного вантажопотоку на паралельні ходи.

### Основний матеріал дослідження

При різних маршрутах перевезень між Києвом і Львовом були виділені південний, північний і проміжний варіанти (рис. 1).



Рис. 1. Маршрути руху поїздів між Києвом і Львовом: *північний* – Київ-Коростень-Шепетівка-Здолбунів-Львів; *південний* – Київ-Жмеринка-Львів; *проміжний* – Київ-Козятин-Шепетівка-Здолбунів-Львів

#### Варіант 1 – Північний.

Маршрут – Київ-Коростень-Здолбунів-Львів. Довжина – 565 км.

Характеристики:

- від Львова до Шепетівки переважає вантажний рух;

- північний хід майже на 60 км коротший від південного варіанту;

- швидкісний поїзд буде цілком завантажуватися від початкової до кінцевої станції і відсутність великих обласних центрів на цьому напрямку не впливає на організацію перевезень, так як немає потреби в проміжних зупинках;

- у північному варіанті не задіяна вантажно-напружена ділянка Київ-Козятин, де курсувало більше 60 пар поїздів на добу.

#### Варіант 2 – Південний.

Маршрут – Київ-Жмеринка-Львів. Довжина – 622 км.

Характеристики:

- переважно пасажирський рух;

- південний хід майже на 60 км довший від північного варіанту;

- на цьому напрямку багато обласних центрів;

- після проведення реконструкції ділянки від Києва до Жмеринки, а потім на Львів, будемо мати половину готового шляху за напрямком від столиці до Одеси.

#### Варіант 3 – Проміжний.

Маршрут – Київ-Козятин-Шепетівка-Здолбунів-Львів. Довжина – 568 км.

Характеристики:

- за довжиною такий як північний варіант;

- використовується в основному для вантажних перевезень.

**Вибір показників для оцінки конкурентних варіантів.** При виборі того чи іншого варіанту слід враховувати їхній технічний стан. Так, наприклад, переключення частини вантажних перевезень на паралельний хід може призвести до необхідності збільшення його пропускної й провізної спроможності. Наприклад, ділянка Коростень-Шепетівка одноколійна з двоколійними вставками, що обмежує її пропускну спроможність у порівнянні з іншими, двоколійними ділянками.

Для оцінки варіантів повинні розглядатись кількісні, якісні й економічні показники. Зупинимося на деяких з них.

**1. Пробіг поїздів (в поїздо-кілометрах і в тонно-кілометрах бруто).** Ці показники відображають технічну і вантажну роботу залізниць. Пробіг поїздів в поїздо-кілометрах визначається за формулою

$$NL = N_1L_1 + N_2L_2 + \dots + N_nL_n, \quad (1)$$

Пробіг поїзда в тонно-кілометрах є сума добутків маси поїзда бруто на відстань його пробігу

$$QL = Q_1L_1 + Q_2L_2 + \dots + Q_nL_n, \quad (2)$$

де  $N_1, N_2, \dots, N_n$  - кількість поїздів;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  - маса поїздів;  $L_1, L_2, \dots, L_n$  - відповідні відстані пробігу цих поїздів.

Виходячи з існуючих обсягів перевезень по ділянці можна сказати, що північний варіант у теперішній час спеціалізується на перевезеннях вантажів, південний варіант, навпаки, – для перевезень пасажирів.

**2. Швидкість руху (час руху) пасажирських поїздів.** Середню швидкість руху пасажирського поїзда без урахування стоянок на проміжних станціях називають технічною швидкістю. Така швидкість визначається за формулою

$$V_{nac}^m = \sum NL_{nac} / \sum NT_{nac}, \quad (3)$$

де  $\sum NL_{nac}$  - сумарний пробіг пасажирських поїздів, поїздо-км;  $\sum NT_{nac}$  - сумарний час знаходження поїздів на ділянці без урахування стоянок пасажирських поїздів на проміжних станціях, год.

**3. Витрати енергоресурсів.** На залізничному транспорті України діє довгострокова Програма енергозбереження. За даними статистичних звітів АТ «Укрзалізниця» із загального обсягу паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) найбільші витрати припадають безпосередньо на тягу поїздів.

Для визначення факторів, які впливають на енергетичні витрати, розглянемо рівняння поїзда

$$F_k = m a + W_o + W_i + W_r. \quad (4)$$

У виразі (4)  $F_k$  - сила тяги локомотива;  $m$  - маса поїзда;  $a$  - прискорення поїзда;  $W_o$  - сила основного опору руху;  $W_i$ ,  $W_r$  - сили додаткового опору руху відповідно від ухилів і кривизни колії.

Значення основного і додаткових опорів руху, визначаються для кожного рухомого складу емпірично [27].

При відомій механічній роботі локомотива (визначається програмно при виконанні тягових розрахунків, витрати електроенергії розраховуються за формулою (5))

$$E = \frac{R_M}{\eta}, \quad (5)$$

де механічна робота локомотива на ділянці довжиною  $L$  визначається як

$$R_M = \int_l F_k ds, \quad (6)$$

В формулі (5)  $R_M$  - сила тяги локомотива, що витрачається на тягу поїздів;  $l$  - частина ділянки  $L$ , на якій сила тяги локомотива  $F_k > 0$ .

До ділянок  $l$  відносяться ділянки розгону, а також ділянки, на яких поїзд рухається з постійною швидкістю на підйомах, площадках і спусках, якщо сила додаткового опору руху від ухилу  $W_i$  і кривизни колії  $W_r$  не перевищує величини основного опору руху, тобто  $(W_i + W_r) < W_o$ .  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії електровоза.

Варіанти, що досліджуються, можуть оцінюватися за різними критеріями (див. п. 1, 2, 3). Вибір оптимального варіанта у такому випадку залежить від того, яким чином критерії зв'язані між собою. Існує кілька підходів для вирішення цієї задачі [11].

Метод зважених сум. У цьому методі кожному критерію призначається вага, яка відображає їх відносну важливість. Результати оцінки кожного варіанта за кожним критерієм множаться на вагу критерію і підсумовуються. Варіант з найвищою зваженою сумою вважається оптимальним

Метод аналізу ієрархій (MAI). В цьому методі критерії порівнюються попарно за їх важливістю. Шляхом зіставлення важливості критеріїв формується матриця парних порівнянь, яка потім піддається обробці для визначення ваги кожного критерію. На основі цього аналізу можна вибрати оптимальний варіант.

Метод ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité): Цей метод використовується для вирішення багатокритеріальних задач прийняття рішень. Він базується на порівнянні варіантів за кожним критерієм та прийнятті рішення на основі ранжування та елімінації варіантів.

Також існують інші методи, такі як методи простору Парето, метод TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), метод вагових коефіцієнтів тощо. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження.

Важливо враховувати контекст задачі та вимоги проекту, так як вони можуть визначати, які критерії є найважливішими і як вони пов'язані між собою.

**Розробка математичних моделей раціонального розподілу поїздопотоків.** Для вирішення задачі оптимального розподілу поїздопотоків між початковим і кінцевим пунктами, мережа залізниць була представлена у вигляді графа  $G(V, E)$ , де станції - це вершини графа (множина  $V$ ), а ділянки між ними - ребра графа (множина  $E$ ). Потік поїздів задається у вигляді матриці  $P_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , де  $n$  - кількість станцій, а  $P_{ij}$  - кількість поїздів з пункту  $i$  в пункт  $j$ .

Враховуючи те, що від однієї станції до іншої можна потрапити різними шляхами, відповідно до графа між пунктами  $i$  й  $j$  існує  $W_{ij}$  простих шляхів. Кожне ребро  $e \in E$  буде характеризуватися трьома параметрами:  $d(e)$  - довжина ребра  $e$ ;  $t(e)$  - час руху поїзда по ребру

$e$ ;  $m(e)$  – механічна робота при русі поїзда по ребру  $e$ .

Позначимо через  $X_{i,j,w}$  кількість поїздів, що рухаються із пункту  $i$  в пункт  $j$  по  $w$ -му простому шляху з переліку  $W_{ij}$ . Тоді

$$P_r = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{w \in W_{ij}} P(w) X_{i,j,w} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $P(w)$  – сумарне значення показника простого шляху  $w$  з переліку  $W_{ij}$ .

Мінімальне значення  $P_r$  визначаємо з урахуванням поїздопотоків, тобто

$$\sum_{w \in W_{ij}} X_{i,j,w} = P_{ij}; \quad i = \overline{1, n-1}; \quad i+1 \leq j \leq n. \quad (8)$$

До даних обмежень додається обмеження за пропускною спроможністю кожного ребра:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{w \in W_{ij}} I_w(e) X_{i,j,w} \leq N(e); \quad e \in E; \quad (9)$$

де  $I_w(e)$  – індикатор ребра  $e$  для шляху  $w$ ,

$$\begin{cases} I_w(e) = 1, e \in w; \\ I_w(e) = 0, e \notin w, \end{cases} \quad (10)$$

$N(e)$  – пропускна спроможність ребра  $e$ .

Розглядалися різні показники оптимізації: поїздо-кілометри ( $P_1$ ), поїздо-години ( $P_2$ ), механічна робота локомотива ( $P_3$ ). Як було вище зазначено, поїздо-кілометри і тонно-кілометри відображають технічну і вантажну роботу залізниць, поїздо-години – середню швидкість руху поїздів, а механічна робота локомотива – витрати електроенергії.

Сформулюємо задачі, які підлягають вирішенню, табл. 1.

Задачі (1–3) можна вирішувати як задачі лінійного програмування. Задачі (4 – 7) вирішуються як задачі векторної оптимізації у лінійній постановці.

На прикладі мережі залізниць, що поєднує Львів і Київ, було виконано дослідження з визначення раціонального розподілу пасажирських та вантажних поїздів. Для розв'язання задачі відповідно до мережі шляхів (рис. 1) створювалась математична модель у вигляді графа  $G(V, E)$  – рис. 2, та матриця потоку поїздів

(рис. 3), яка відображає кількість поїздів, що приймають з початкової до кінцевої станції.

Таблиця 1

Умови для задач, які підлягають вирішенню

| № задачі | Умова  |
|----------|--|
| 1        | $P_1 \rightarrow \min \quad P_2 \leq \overline{P_2}; \quad P_3 \leq \overline{P_3};$       |
| 2        | $P_2 \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1}; \quad P_3 \leq \overline{P_3};$       |
| 3        | $P_3 \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1}; \quad P_2 \leq \overline{P_2};$       |
| 4        | $\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_3 \leq \overline{P_3};$ |
| 5        | $\begin{pmatrix} P_1 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_2 \leq \overline{P_2};$ |
| 6        | $\begin{pmatrix} P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1};$ |
| 7        | $\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min$                         |

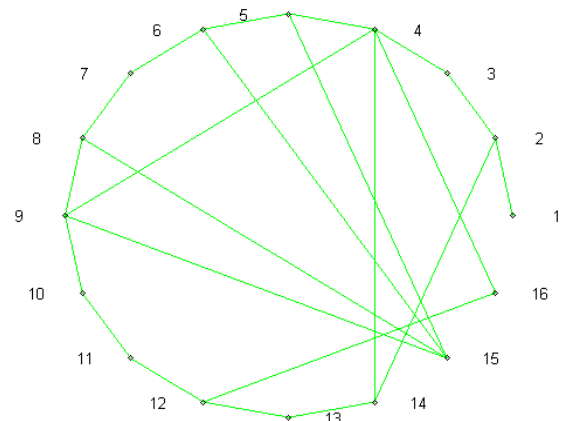


Рис. 2. Математична модель мережі у вигляді графа  $G(V, E)$

$$P_p := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 1 & 37 & 0 & 0 & 1 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 6 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 37 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 15 & 0 & 0 & 13 & 9 & 0 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 1 & 0 & 0 & 6 & 13 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 9 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Матриця потоку поїздів



Кожне ребро графа (рис. 2) характеризується довжиною, часом руху та механічною роботою. При цьому задається обмеження за пропускнуною спроможністю ребра в залежності від кількості колій на ділянці та обмеження за довжиною маршруту.

Результати розрахунків за різними показниками оптимізації для пасажирських поїздів представлені в табл. 2. Використання розробленої авторами математичної моделі раціонального розподілу поїздопотоків і методики

визначення раціональних параметрів плану на напрямках пасажирського, суміщеного й вантажного руху дозволяють вирішувати поставлені Укрзалізницею завдання.

Як впливає з табл. 2 маршрути слідування пасажирського поїзда за різними показниками оптимізації поїздо-кілометри ( $P_1$ ), поїздо-години ( $P_2$ ), механічна робота локомотива ( $P_3$ ) відрізняються (задачі 1-3).

Таблиця 2

Маршрут слідування пасажирського поїзда за різними показниками оптимізації

| Показник                                   | Маршрут слідування  |
|--|---|
| Поїздо-км<br>(парний і непарний напрямки)  | Львів-Красне-Здолбунів-Шепетівка-Новоград-Волинський-Коростень-Київ |
| Поїздо-час<br>(парний і непарний напрямки) | Львів-Красне-Здолбунів-Шепетівка-Бердичів-Фастів-Київ               |
| Поїздо-ткм<br>(парний напрямок)            | Львів-Красне-Тернопіль-Шепетівка-Новоград-Волинський-Коростень-Київ |
| Поїздо-ткм<br>(непарний напрямок)          | Львів-Красне-Здолбунів-Шепетівка-Козятин-Фастів-Київ                |

**Розподіл поїздопотоків за показником сумарної роботи сил, що діють на колію.** Переключення перевезень на паралельні ходи призводить до зміни інтенсивності руху вантажних і пасажирських поїздів, що впливає на напружено-деформований стан колії, а в кінцевому результаті на експлуатаційні витрати, ремонт і утримання колійної інфраструктури.

Для підтвердження сказаного, на рис. 4 показано графік зміни механічної роботи сили тяги

локомотива уздовж ділянки. З рисунку видно, що значення цього фактору суттєво змінюються по довжині лінії і залежить від параметрів позовдовжнього профілю, плану, наявності обмежень швидкості, режиму ведення поїзду, швидкості руху тощо. Отже і вплив на знос колійної інфраструктури на таких ділянках буде різний, що й було враховано в подальшому.

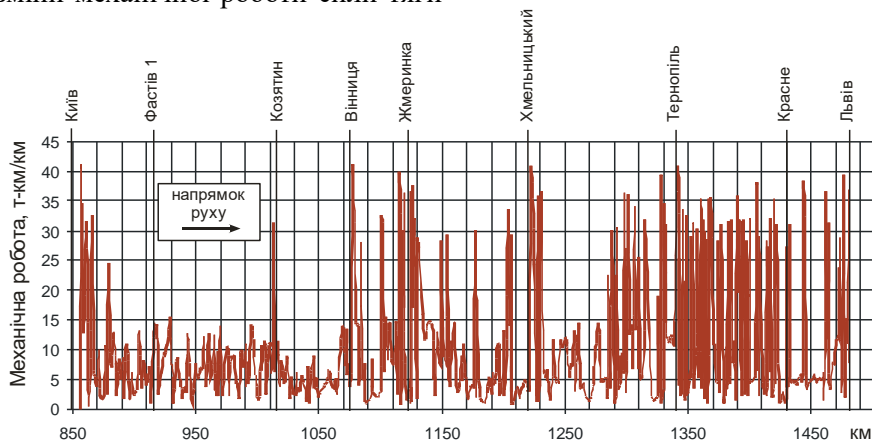


Рис. 4. Графік зміни механічної роботи сили тяги локомотива при русі пасажирського поїзда від Києва до Львова

При розмежуванні вантажного й пасажирського руху змінюється структура поїздопотоків, тому представляє інтерес дослідження основних факторів на знос колійної інфраструктури на паралельних ходах – напрямках вантажного й пасажирського руху. Для вирішення такої задачі було використано комплексний показник, який

дозволяє порівнювати різні варіанти за сумарною дією на колію потоку поїздів протягом встановленого терміну експлуатації. Оптимальним будемо вважати такий маршрут, по якому можна доставити вантаж в найкоротші терміни з мінімальними витратами.



Загальну дію рухомого складу  $D$ , що призводить до зносу колійної інфраструктури, можна представити як роботу поздовжньої  $D_{\text{позд}}$ , поперечної  $D_{\text{нон}}$  і вертикальної  $D_{\text{верт}}$  сил

$$D = \sqrt{D_{\text{позд}}^2 + D_{\text{нон}}^2 + D_{\text{верт}}^2}, \quad (11)$$

Кожна з названих сил визначається як добуток відповідного прискорення  $\alpha_{\text{позд}}$ ,  $\alpha_{\text{нон}}$ ,  $\alpha_{\text{верт}}$  на масу рухомого складу, а робота сил – як добуток сили на переміщення у відповідній площині.

Робота поздовжніх сил визначалась через поздовжні прискорення, які були отримані при виконанні тягових розрахунків, як зміна швидкості руху поїзда за одиницю часу  $\alpha_{\text{позд}} = \frac{dV}{dt}$ .

Робота поздовжніх сил від дії рухомого складу на колію була представлена як сума механічної роботи локомотива та роботи сил гальмування і з достатньою точністю для кожної категорії поїздів визначалась за формулою

$$D_{\text{позд}} = \frac{Q \cdot L}{1000} \cdot \left( a + \frac{b \cdot Q + c \cdot l_{\text{пер}}}{1000} \right), \quad (12)$$

де  $Q$  - маса поїзда, т;  $L$  - довжина ділянки, км;  $l_{\text{пер}}$  - середня довжина ділянки між пунктами зупинки поїздів, км;  $a, b, c$  - коефіцієнти апроксимації (табл. 3).

В результаті проведеного факторного аналізу встановлено, що найбільш тісні зв'язки існують між факторами, що призводять до зносу залізничної колії: робота сил опору і гальмівних сил, робота бокових і вертикальних сил. Впливають

на знос також вид тяги, типи поїздів, складність плану й профілю, швидкість руху і маса поїздів, довжина перегону.

Отримані розрахунком коефіцієнти апроксимації  $a, b, c$  для різних категорій поїздів та різних умов профілю і плану лінії наведені в табл. 3.

Для зменшення похибки апроксимації були, по-перше, відокремлені тепловозна та електрична тяги. По-друге, окремо розглядалися вантажні, приміські, пасажирські поїзди та експреси, по-третє, в окремі групи були виділені ділянки за середнім ухилом поздовжнього профілю  $i_{\text{середн.}}$  за такою градацією:  $i_{\text{середн.}} < 4\text{‰}$  – легкий профіль;  $4\text{‰} \leq i_{\text{середн.}} \leq 8\text{‰}$  – середній профіль;  $i_{\text{середн.}} > 8\text{‰}$  – важкий профіль. Для пасажирських поїздів та експресів крім того введено розподілення за складністю плану лінії через середній радіус:  $R_{\text{середн.}} \geq 2000 \text{ м}$  – легкий план;  $2000 \text{ м} > R_{\text{середн.}} \geq 1000 \text{ м}$  – середній план;  $R_{\text{середн.}} < 1000 \text{ м}$  – важкий план.

Фактором, який враховує динамічне навантаження, є робота вертикальних сил, яка визначається як добуток динамічної вертикальної сили, що діє на рейку, на прогин рейко-шпальної решітки під впливом цієї сили. Методика визначення роботи вертикальних сил, що діють на колію, викладена в роботі [29].

Для визначення роботи вертикальних сил ( $\text{кН} \cdot \text{м}$ ) підчас моделювання руху поїзда по ділянці за програмою MoveRW [30] були отримані аналітичні залежності. Наприклад, для електровоза ДЕ1  $D_{\text{верт.}} = 0,117V + 14,381$ , для ДСЗ  $D_{\text{верт.}} = 0,073V + 10,153$  і т. д.

Таблиця 3

**Коефіцієнти апроксимації (тяга електрична)**

| Категорія поїздів | Складність профілю | Складність плану | $a$    | $b$     | $c$    |
|-------------------|--------------------|------------------|--------|---------|--------|
| Вантажні          | легкий             | Будь-яка         | 14,264 | -0,774  | -115,3 |
|                   | середній           |                  | 16,037 | -1,103  | -120,5 |
|                   | важкий             |                  | 18,522 | -1,578  | -108,9 |
| Пасажирські       | легкий             | Легкий           | 31,319 | -8,240  | -332,7 |
|                   | середній           |                  | 32,607 | -8,728  | -328,2 |
|                   | важкий             |                  | 34,994 | -9,857  | -314,8 |
|                   | легкий             | Середній         | 32,858 | -9,714  | -329,7 |
|                   | середній           |                  | 34,089 | -10,138 | -325,4 |
|                   | важкий             |                  | 36,231 | -11,123 | -311,7 |
|                   | легкий             | Важкий           | 28,280 | -8,985  | -222,7 |
|                   | середній           |                  | 29,560 | -9,299  | -221,8 |
|                   | важкий             |                  | 31,797 | -10,030 | -215,8 |

Визначення роботи непогашених відцентрових сил і підвищень, які були б оптимальними за критерієм мінімуму роботи, передбачені у програмі RWPlan [31]. Розрахунки виконуються наступним чином.

1. В програму RWPlan вводяться дані, що відтворюють існуючий план (за даними поздовжнього профілю або за результатами зйомки)

2. За програмою MoveRW виконуються тягові розрахунки для різних категорій поїздів, що обертаються на ділянці

3. У програмі RWPlan задаються поїздопоток для існуючого стану, а швидкості руху поїздів в кривих за результатами тягових розрахунків.

4. Для заданого поїздопоток визначається робота непогашених відцентрових сил для існуючого стану і знаходяться підвищення, які для

цього поїздопоток забезпечать максимально допустимі швидкості і мінімум зносу колії.

5. Для пасажирського руху за спеціальною методикою в програмі RWPlan виконуються розрахунки перевлаштування плану в межах земляного полотна, яка забезпечить максимальні швидкості пасажирських поїздів.

6. На основі результатів тягових розрахунків формуються нові структури поїздопотоків і знаходяться підвищення для проектного плану лінії за умови мінімуму роботи непогашених відцентрових сил і забезпечення встановлених швидкостей руху.

За наведеною технологією були виконані розрахунки на різних напрямках. Для прикладу в табл. 4 наведені дані для ділянок Київ-Коростень, Київ-Козятин, Козятин-Шепетівка і Шепетівка-Коростень.

Таблиця 4

Результати розрахунків дії непогашених відцентрових сил  $R_{gid}$  на колію

| Ділянки               | $G$ ,<br>млн. т | $Q$ ,<br>тонн | $N$ ,<br>поїздів | Значення $R_{gid}$ , тис. ткм |          |                          |          |
|-----------------------|-----------------|---------------|------------------|-------------------------------|----------|--------------------------|----------|
|                       |                 |               |                  | Поїздопотік за $h_{icn}$      |          | Поїздопотік за $h_{onm}$ |          |
|                       |                 |               |                  | парний                        | непарний | парний                   | непарний |
| Київ - Коростень      | 4,0             | 4000          | 1500             | 18934                         | 19820    | 11963                    | 12788    |
| Київ - Козятин        | 51,8            | 4600          | 19500            | 128901                        | 91221    | 61760                    | 68721    |
| Козятин - Шепетівка   | 41,7            | 4600          | 17888            | 134535                        | 130087   | 85941                    | 85337    |
| Шепетівка - Коростень | 3,0             | 3600          | 1150             | 7507                          | 7720     | 4214                     | 4203     |

Переваги вище описаного підходу полягають в тому, що визначається робота непогашених відцентрових сил  $R_{gid}$  (прототип роботи поперечних сил  $D_{non}$ ) не тільки для існуючого стану параметрів плану залізниці, але й для проектних параметрів кривих, які пропонується встановити після модернізації колії. Тобто визначається раціональне підвищення зовнішньої рейки в кривих для заданого поїздопоток, при якому буде найменша сумарна робота непогашених відцентрових сил.

Наступним кроком є знаходження раціонального розподілу поїздів між паралельними ходами за критерієм відношення загальної роботи всіх сил, що діють від поїздів на колію, до часу руху кожної категорії поїздів. За результатами розрахунків на рис. 5 показано розподіл пасажирських поїздів, які прямують з Києва до Львова. Такі ж розрахунки були виконанні для вантажних поїздів.

Окремі результати дослідження доповідалися на Всеукраїнській науковій конференції «Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів, загроз» [32]. Рекомендації подальшого дослідження стосуються визначенню

такого комплексного показника, який би враховував логістику транспортного процесу під час змішаних вантажних перевезень і мобільність пасажирських перевезень. Встановлено, що поставлена проблема може вирішуватись як математична багатокритеріальна оптимізаційна задача [26].

## Висновки

1. На основі результатів проведеного дослідження запропоновано математичну модель раціонального розподілу поїздопотоків, застосування якої дозволяє обґрунтовано обирати найбільш придатний варіант як за одним, так і за декількома критеріями одночасно. Раціональний розподіл дає змогу вирішувати поставлені Укрзалізницею завдання, скоротивши час руху поїздів і зменшивши при цьому витрати на пробіг поїздів, ремонт і утримання залізничної колії.

2. Запропоновано способи зменшення дії непогашених відцентрових сил в кривих ділянках колії. Розрахунки показали, що влаштування підвищення зовнішньої рейки в кривих за умови мінімуму роботи непогашених відцентрових сил дозволяє для ділянок, що розглядалися, зменшити цю роботу на 10-15 %.

3. Запропоновано способи зменшення дії роботи поздовжніх сил за рахунок встановлення раціональної швидкості руху поїздів та зменшення роботи вертикальних сил за рахунок відокремлення вантажного руху від пасажирського, що дозволяє на 12-21 % скоротити витрати на ремонт колії та рухомого складу.

4. На пасажирських і вантажних напрямках значно скорочується кількість обгонів поїздів, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат, пов'язаних з гальмуванням, зупинками і розгоном поїздів, зменшується коефіцієнт зняття вантажних поїздів пасажирськими, що позитивно впливає на пропускну спроможність.

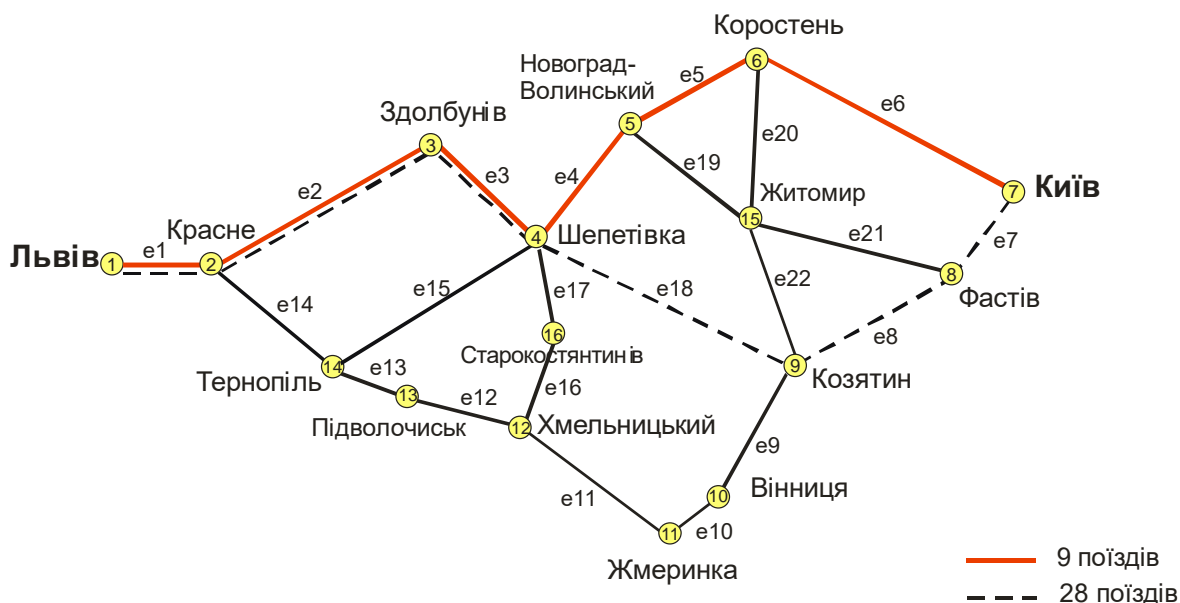


Рис. 5. Раціональний розподіл пасажирських поїздів, що слідують зі Львова до Києва між паралельними ходами

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport // *Matec*. – 2018. – Vol. 230. pp. 01007. doi: 10.1051/mateconf/201823001007.
2. Evrim Ursavas, Stuart X. Zhu (2017). Integrated Passenger and Freight Train Planning on Shared-Use Corridors. *Transportation Science* 52(6). DOI:10.1287/trsc.2017.0796
3. Shengdong Li, Hongxia Lv, Changan Xu, Tao Chen, Congcong Zou (2020). Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling. *IEEE Access* (8), 40777-40790. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2976904
4. Christos Pyrgidis, Evangelos Christogiannis. The Problems of the Presence of Passenger and Freight Trains on the Same Track // *Transport Research Arena – Athens*. <https://www.researchgate.net/publication/271889462>
5. Chornopyska, N.; Stasiuk, K. (2020). Logistics Potential of the Railway as a Key for Sustainable and Secure Transport Development, *Transport Means*, 421-425. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/346427093\\_Logistics\\_Potential\\_of\\_the\\_Railway\\_as\\_a\\_Key\\_for\\_Sustainable\\_and\\_Secure\\_Transport\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/346427093_Logistics_Potential_of_the_Railway_as_a_Key_for_Sustainable_and_Secure_Transport_Development) [accessed May 03 2023].
6. Kurhan M., Kurhan D., Černiauskaite L. (2019). Rationale of priority areas of rail operation in north-eastern Europe // *Transport Means*, 1439-1444.
7. M. Szkoda, A. Tulecki (2008). Decision models in effectiveness evaluation of Europe-Asia Transportation

8. Kozachenko D.; Skalozub V.; Gera B.; Hermaniuk Y.; Korobiova R.; Gorbova A. (2019). A model of transit freight distribution on a railway network, *Transport Problems* 14(3), 17-26. DOI:10.20858/tp.2019.14.3.2
9. Tarapata Z. (2015). Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study. *The Archives of Transport*. 36 (4), 55-65. DOI: 10.5604/08669546.1185207
10. Marianna Jacyna, Mariusz Wasiak, Konrad Lewczuk & Michał Kłodawski (2015). Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport. *Archives of Transport*, 31(3), 23-35. DOI: 10.5604/08669546.1146982
11. Scientific and Technical Support Development Railway Transport in International Traffic [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/10482\\_jgbcfyj](http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/10482_jgbcfyj)
12. Mirosław Siergiejczyk, Karolina Krzykowska-Piotrowska (2019). Research Methods and Solutions to Current Transport Problems Proceedings of the International Scientific Conference Transport of the 21st Century, 9– 12th of June 2019, Ryn, Poland: Proceedings of the International Scientific Conference Transport of the

21st Century, 9– 12th of June 2019, Ryn, Poland. DOI:10.1007/978-3-030-27687-4, 494 s.

13. Mykola Kurhan, Viktor Verbitskii, Dmytro Kurhan (2019). Difference research of Ukrainian and European railway infrastructure. *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport* 5(83), 52-70. DOI:10.15802/stp2019/184497

14. Zhipeng Huang, Niu Huimin (2012). The Mode of Combined Multi-speed Freight Trains under Separation of Passenger and Freight Transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 43(6), 709–717. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.04.144

15. Rotoli Francesco, Malavasi Gabriele & Ricci Stefano (2016). Complex railway systems: capacity and utilisation of interconnected networks. *European Transport Research Review* 8(4), 21-29. DOI:10.1007/s12544-016-0216-6

16. Hamed Pouryousef, Pasi Lautala, Thomas White (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*. 23(1), 30–42. DOI 10.1007/s40534-015-0069-z

17. Allan Woodburn (2017). The impacts on freight train operational performance of new rail infrastructure to segregate passenger and freight traffic. *Journal of Transport Geography*, 176-185. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.12.006

18. Dinger M, Lai YC, Barkan C. (2009) Impact of train type heterogeneity on single-track railway capacity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 41–49. <https://doi.org/10.3141/2117-06>

19. Lai YC, Lin YJ, Cheng YF (2014) Assessment of capacity charges for shared-use rail lines. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 62–70. DOI:10.3141/2448-08

20. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects [online cit.: 2021-06-27]. Available from: [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba\\_guide.pdf](https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf). doi:10.2776/97516

21. Dac Criteria for Evaluating Development Assistance [online cit.: 2021-06-27]. Available from: <https://www.oecd.org/dac/evaluation/49756382.pdf>

22. Results-Based Management approach as applied at UNESCO [online cit.: 2021-06-27]. Available from: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000177568>

23. Kurhan D., Kurhan M. (2019). Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. Vol. 708. – p. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012013.

24. Dinger M, Lai YC, Barkan C (2009) Impact of

train type heterogeneity on single-track railway capacity. *Transportation Res. Record: J. Transportation Res. Board* 2117, 41–49.

25. Ján Ližbetin, Ján Ponický, Vladislav Zitrický (2016). The Throughput Capacity of Rail Freight Corridors on the Particular Railways Network. Ukupan izravni kapacitet koridora željezničkog prijevoza na posebnim mrežama željeznica. «*Naše more*» 63(3), 161-169. DOI 10.17818/NM/2016/SI16

26. Kurhan M., Kurhan D., Husak M., Hmelevska N. (2022). Increasing the Efficiency of the Railway Operation in the Specialization of Directions for Freight and Passenger Transportation. *Acta Polytechnica Hungarica* 19(3), 231-244. DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.18>

27. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги. Монографія у 2 т. / Г. К. Гетьман – Дн-вськ: Вид. Маковецький, 2011. Т. 1.- 456 с.

28. Артемчук, В. В. Необхідні умови в задачі векторної оптимізації для функціоналів стосовно відновлювальних технологій / В. В. Артемчук, А. А. Босов // Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія : Нові рішення в сучасних технологіях: сб. наук. пр. – Харків, 2012. – Вип. 34. – С. 41–49. <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16292>

29. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоку на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип.19. – С. 78-83.

30. Корженевич І. П. Знайомство з роботою в програмі MowerRW [Електронний ресурс] / І. П. Корженевич. – 2011. – 12 с. – Режим доступу: [http://www.brailsys.com/MoveRW\\_0.htm](http://www.brailsys.com/MoveRW_0.htm)

31. Корженевич І. П. Знайомство з роботою в програмі RWPlan [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://brailsys.com/>, [http://www.brailsys.com/RWPlan\\_0.htm](http://www.brailsys.com/RWPlan_0.htm)

32. Гусак М.А., Новік Р.Б., Хмелевська Н.П., Мунтян А.О. Визначення раціональних маршрутів для підвищення рівня організації перевезень та управління логістичними системами: збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції «Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів, загроз» (с. 32-36). 28 жовтня 2022 р. – УДУНТ, Дніпро: 2022.

Надійшла до редколегії 26.04.2023.  
Прийнята до друку 12.05.2023.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION ON LINES WITH PARALLEL RUNS

**Purpose.** The purpose of the work is to determine measures to improve logistics operations with the specialization of directions for cargo and passenger transportation by transferring part of the transit cargo flow to parallel routes. Solving the problem of choosing a rational distribution of freight and passenger transportation depending on the specialization of directions will allow to optimize the use of throughput and transportation capacity and investments in infrastructure development. **Method.** Optimization of the transport process during mixed transportation involves the possibility of separating cargo traffic from passenger traffic. The proposed method involves solving the problem of choosing a rational distribution of cargo and passenger transportation depending on the specialization of directions. The idea of such demarcation is based on the fact that on the railway network it is possible to distinguish stations between which there are several parallel train routes. The research was carried out on the railway network connecting Lviv and Kyiv. When solving the problem, various indicators were considered: the length of the route, the time of movement, the mechanical operation of the locomotive, the load on the track, and others. In addition, the boundary conditions were taken into account: the volume of passenger traffic, cargo traffic, the carrying capacity of sections and the permissible speed of train movement. **Results.** A mathematical model of the redistribution of train flows on the railway network has been developed, which ensures the rational operation of the railway track with minimal costs for the reconstruction of the railway. **Scientific novelty.** It has been established that in the case of traffic separation, the timing of repairs may be different due to lower traffic intensity, which allows you to focus on specific types of repair work, and not on all types of work at the same time. Although the general principles of the periodicity of repairs may remain the same in both cases, periodicity schemes may differ depending on many factors, in particular, the intensity of operation, the technical condition of the vehicle, the timing of repairs and the availability of specialized personnel. **Practical significance.** With the application of the new approaches proposed by the authors to solving the tasks, schemes for the rational distribution of cargo and passenger transportation at the closed landfills of the regional branches of the South-Western and Lviv Railways were established, which will allow determining measures to improve logistics operations and reduce operating costs for the transportation of cargo and passengers.

*Key words:* railway transportation, transportation specialization, distribution of transportation, cargo flow, logistics, rolling stock, operational expenses, optimization