

Д-р техн. наук. ПРОХОРЧЕНКО А.В., Асп. ХАРЧЕНКО Д.Р.,
доктори філософії КИМАН А.М., КРАВЧЕНКО М.А.
ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В., д.т.н, професор,



Дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у залізничних системах

Анотація. У статті досліджено правила пріоритетності руху поїздопотоків у різних залізничних системах світу для виявлення закономірностей, проблем і дієвих практик у встановленні пріоритетів для удосконалення чи розроблення нових правил пріоритетності, які підвищать ефективність роботи залізничної системи України. Проведено класифікацію критеріїв пріоритизації та проаналізовано законодавчу базу. На основі порівняльного аналізу вибраних показників залізничних систем світу виявлено значно завищений показник пунктуальності (рівня виконання графіка руху) пасажирських поїздів на залізниці України. На основі розрахунку дендрограми ієрархічної кластеризації чисельно доведена належність залізниці України до переважно вантажних залізниць із незначним пасажирським рухом. Виявлено, що сучасна перевага пасажирського руху викривляє властивості системи.

Ключові слова: залізнична система, пропускна спроможність, перевантажена інфраструктура, поїздопотік, пріоритизація, пунктуальність.

Вступ.

Для стійкого розвитку залізничної системи важливим є ефективне використання її активів. Однак нерівномірність збільшення попиту в часі і просторі в залізничній системі на будь-який обмежений актив породжує перевантаженість елементів системи. За таких умов важливим є створення механізмів уникнення перевантаження елементів інфраструктури залізничної системи.

Залізнична система України належить до систем зі змішаним рухом пасажирських і вантажних поїздів, експлуатованих на одній інфраструктурі. Практичний досвід роботи національного монопольного перевізника АТ «Укрзалізниця» (АТ УЗ) свідчить про існування значних сплесків попиту як у пасажирських, так і вантажних перевезеннях. Виникнення таких ситуацій призводить до створення конфліктів за наявних обмежених активів, зокрема залізничної інфраструктури. АТ УЗ є вертикально-інтегрованою, де всі рішення з розподілу пасажирських поїздопотоків у залізничній мережі ухвалюють на основі нормативних правил, а у випадку конфліктів у графіку руху поїздів (ГРП) між вантажними поїздами правила є непрозорими та не забезпечують недискримінаційний доступ. Це значний недолік у системі управління рухом поїздів на залізничній мережі, що призводить до неефективного розподілу пропускної спроможності в умовах дефіциту пропускної спроможності інфраструктури.

Як наслідок, виникають збільшення кількості та тривалості затримок поїздів, швидше вичерпується наявна пропускна спроможність на перевантажених дільницях, а отже, збільшення собівартості залізничних послуг із перевезень.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні дієвих правил пріоритетності руху різного виду поїздопотоків, що дасть змогу уникати перевантаження залізничної інфраструктури. За таких умов постає завдання дослідження підходів для побудови правил пріоритетності руху в різних залізничних системах країн світу для пошуку ефективних критеріїв пріоритизації поїздопотоків. Отже, вирішення завдання дослідження правил пріоритизації поїздопотоків є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Теоретичних і практичних досліджень із вирішення завдання визначення критеріїв для побудови ефективних правил пріоритетності руху поїздопотоків є досить багато [1]-5]. Необхідно розділяти дослідження для різних видів залізничних систем. Одні підходи стосуються залізничних систем із вертикальним розділенням, зокрема залізниць-країн Європейського Союзу (ЄС). Наприклад, робота [2] присвячена огляду дерегульованих залізничних ринків країн-учасниць ЄС, а також методів розподілу пропускної спроможності на них, розвитку залізничного ринку в ЄС, регулюючого законодавства, а також організації розподілу наявної пропускної спроможності в умовах конфлікту. Дослідження [1] зосереджено на різних метода

х розподілу пропускної спроможності, авторами досліджено переваги та недоліки кожного методу. Асоціацією операторів європейської залізничної інфраструктури (англ. RailNetEurope, RNE) у 2023 році був опублікований звіт щодо правил пріоритетності на залізницях країн-учасниць ЄС [5]. Звіт присвячено практичному розгляду сучасних підходів з визначення правил пріоритетності на кожній залізниці у ЄС, а також аналізу правового регулювання під час встановлення критеріїв пріоритетності. Однак вищевказані роботи більше присвячені загальному аналізу конфліктів під час розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури до затвердження зведеного графіка руху і майже не досліджують питання вирішення конфліктів в умовах перевантаження залізничної інфраструктури. У роботі [3] авторами розглянуто правове регулювання процедури розподілу пропускної спроможності. Зокрема авторами проаналізовано вплив директив ЄС 91/440/EU і 2012/34/EU на функціонування залізничного ринку за моделлю відкритого доступу. Зроблено висновок, що сучасні механізми розподілу пропускної спроможності в умовах перевантаженості залізничної інфраструктури не забезпечують ухвалення оптимальних та ефективних рішень під час управління рухом на дільниці з перевантаженістю. Як альтернативу чинним правилам пріоритетності автори пропонують використовувати децентралізований механізм на основі аукціонів для розподілу пропускної спроможності. Дослідження [4] розвиває питання ефективності від впровадження децентралізованого розподілу пропускної спроможності в умовах перевантаженості. Авторами промодельовано процедуру розподілу пропускної спроможності за допомогою різних типів аукціонів. За результатами дослідження було зроблено висновок, що використання аукціонів для розподілу пропускної спроможності, хоч і має певні недоліки, однак метод забезпечує справедливий розподіл пропускної спроможності в умовах відкритого ринку залізничних перевезень.

Існують дослідження, присвячені вирішенню проблеми розподілу пропускної спроможності в умовах дефіциту інфраструктури на основі використання критеріїв пріоритетності. Зокрема, у роботі [6] для вирішення проблеми планування поїздів (англ. train scheduling problem, TSP) у контексті функціонування Індійських залізниць, де існує неоднорідність руху поїздопотоків на дільниці, авторами запропоновано використовувати алгоритм оптимізації на основі мурашиних колоній (англ. Ant Colony Optimization, ACO). Для функціонування моделі на основі ACO були

використані критерії пріоритетності, які відображують тип поїзда, швидкість руху, загальний час у дорозі та час зупинок на станціях. У дослідженні [7] для визначення пріоритетності з використанням математичної моделі з розподілу напрямків множників на основі пріоритетів (ADMM-P) запропоновано використовувати критерій пріоритетності, який являє собою розрахунок сукупних дуальних витрат (англ. dual costs) для кожної нитки (вантажної та пасажирської), прокладеної у графіку руху.

Для вирішення розподілу пропускної спроможності шляхом пріоритизації поїздопотоків активно використовують математичні моделі на основі нейронних мереж [8, 9], запропоновано застосовувати нейронну мережу з використанням навчання з підкріпленням для побудови графіка руху на двонаправлених залізничних дільницях зі змішаним рухом. Для визначення пріоритетності автори використовують критерії, які відображують швидкість поїзда, його тип, місце відправлення та пункт призначення.

Окремим підходом є дослідження [10, 11], де розглянуто інтегровані залізничні системи. У роботі [10] на основі аналізу показника обігу вантажного вагона було сформовано цільову функцію, за якою визначають пріоритетність відправлення поїздів зі станції. Критеріями пріоритетності, за допомогою якої формується функція, є термін доставлення вантажів, кількість вагонів із простроченим терміном у складі поїзда, відстань прямування поїзда, час на виконання вантажних операцій із вагонами, час на переробку на технічних станціях. Однак запропонована функція має сенс лише під час визначення пріоритетності відправлення вантажних поїздів і не має методик визначення пріоритетності в умовах функціонування різного виду поїздопотоків. Дослідження [11] присвячене проблемі визначення факторів, що впливають на черговість обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. Для вирішення цієї проблеми авторами було запропоновано використання нейромережевої моделі для формування критеріїв пріоритетності для кожного вагона. Запропонована модель використовує такі критерії пріоритетності: рівень затримки в доставленні, залишковий час і величину штрафу, і в подальшому класифікує кожен вагон за чотирма класами пріоритетності (звичайний, середній, високий і винятковий). Однак це дослідження спрямовано лише на збільшення ефективності під час операції з обробки вантажного вагонопотоку. У ньому не врахований механізм розподілу пропускної спроможності під час відправлення сформованого складу на перевантажену дільницю.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у різних залізничних системах світу для виявлення закономірностей, проблем і дієвих практик у встановленні пріоритетів, що дають змогу удосконалити чи розробити нові правила пріоритетності, які підвищать ефективність роботи залізничної системи України.

Досягнення поставленої мети здійснено шляхом вирішення таких завдань дослідження:

– складено класифікатор критеріїв пріоритетності руху поїздів, використовуваних на залізницях світу, і проаналізовано законодавчу базу щодо встановлення правил пріоритету;

– проведено порівняльний аналіз вибраних показників залізничних систем світу і класифіковано властивості залізничної системи України між іншими залізницями світу на основі методів ієрархічної кластеризації.

Викладення основного матеріалу.

Механізм управління рухом на перевантажених дільницях має забезпечувати мінімізацію часових та експлуатаційних витрат і дотримання встановленого розкладу руху для кожного поїзда, який знаходиться на дільниці з дефіцитом пропускної спроможності. Механізм має бути реалізований на основі процедури розподілу пропускної спроможності під час побудови щорічного ГРП. Ця процедура передбачає вирішення конфліктів у ГРП щодо проходження перевантаженої дільниці з використанням заздалегідь визначених критеріїв пріоритетності, що встановлено для кожного поїзда, нитка якого закладена у графіку руху [12, 13]. Такі критерії мають бути прозорими та чіткими і забезпечувати недискримінаційну політику щодо визначення порядку проходження через перевантажену дільницю для кожного залізничного перевізника.

Критерії пріоритетності можна класифікувати за трьома основними напрямками: адміністративний, експлуатаційно-економічний і з використанням механізму аукціонів. Характеристика адміністративного напрямку передбачає існування заздалегідь визначених критеріїв пріоритетності з боку оператора інфраструктури (англ. Infrastructure Manage, IM) або національного законодавства. Складовими змінними, використовуваними для формування критеріїв за допомогою адміністративного напрямку, є тип поїзда, різновид перевезень і характеристика вантажу, що перевозять. Критерії пріоритетності, сформовані за допомогою адміністративного напрямку, можуть бути соціально орієнтованими або вантажоорієнтованими. Соціальна орієнтованість

передбачає надання пріоритетності в русі через перевантажену дільницю малоприбутковим поїздам, які мають високу суспільну важливість для населення або держави та забезпечують важливий соціальний внесок у її розвиток. Використання соціально орієнтованих критеріїв не забезпечить ухвалення оптимальних рішень, які збільшать ефективність використання перевантаженої дільниці, однак сприятиме підтримці та збільшенню якості соціально важливих перевезень (зокрема пасажирських). Надання пріоритетності соціальним перевезенням є досить розповсюдженим у країнах із відкритим ринком перевезень і розвинутою залізничною мережею.

Альтернативою соціальній орієнтованості з визначення критеріїв пріоритетності є орієнтованість у наданні пріоритетності вантажним поїздам (вантажна орієнтованість). У цьому випадку на дільниці з недостатньою пропускною спроможністю пріоритетність надають вантажному поїздопотоку, що забезпечує збільшення економічної ефективності від функціонування перевантаженої дільниці, однак зменшує якість пасажирських перевезень через необхідність у пропусканні вантажних поїздів із більш низькою середньою швидкістю. На сьогодні на практиці вантажний напрям визначення критеріїв пріоритетності характерний для залізничних систем із горизонтальним поділом залізничних ринків.

Концепція формування критеріїв пріоритетності за допомогою аналізу експлуатаційно-економічних показників передбачає застосування і подальший аналіз статистичних та економічних даних про певний поїзд або ефективність використання перевантаженої дільниці. Пріоритетними в русі є поїзди, які мають найбільший рівень економічної або експлуатаційної ефективності від їх проходження через перевантажену дільницю серед усіх наявних поїздів у графіку руху. Визначення критеріїв пріоритетності за допомогою такої концепції може відбуватися за допомогою математичних моделей за правилами, заснованими на аналізі експлуатаційних даних [13, 14]:

– правило найбільшої затримки. Критерій пріоритетності визначають рівнем часового відхилення поїзда від встановленого розкладом руху. Поїзд із більшим рівнем відхилення від розкладу руху має пріоритет над поїздами, що знаходяться «у графіку» або з меншим часом затримки. Критерії пріоритетності, побудовані з використанням такого правила, забезпечать мінімізацію часу затримки для поїздів, які вже мають відхилення від встановленого розкладу руху, однак сприятиме виникненню нових затримок для поїздів із меншим часом затримки. Це правило доцільно використовувати під час

глобального порушення ГПП для зменшення максимального часу затримки для всіх поїздів;

- правило найкращих витрат (англ. Best Cost Priority Rule (BCPR)). Критерій пріоритетності визначають шляхом обчислення витрат (часових або експлуатаційних) від проходження поїздом перевантаженої дільниці та загальний вплив на рівень витрат для інших поїздів. Перевагу надають поїзду, проходження якого через перевантажену дільницю забезпечує мінімальні витрати для всіх інших поїздів. Використання такого методу є найефективнішим серед інших, однак потребує обчислення кожного можливого рішення на рівні витрат інших для поїздів, що унеможливує його використання під час оперативного втручання;

- правило раннього виходу (англ. Early Finish Priority Rule (EFPR)). У випадку використання цього правила критерій пріоритетності можна визначити двома способами:

1) розрахування загального часу проходження поїзда через перевантажену дільницю. Пріоритет мають ті поїзди, у яких час виходу з перевантаженої дільниці найменший;

2) визначення середньої швидкості поїзда. Перевагу надають поїздам із більшою швидкістю на дільниці.

Використання правила EFPR є схожим із BCPR, однак EFPR концентрується лише на одному поїзді без урахування наявної всієї ситуації на перевантаженій дільниці;

- правило раннього входу (англ. Early Start Priority Rule (ESPR)). Критерій пріоритетності визначають за часом в'їзду поїзда на перевантажену дільницю. Перевагу мають поїзди, у яких час прибуття на перевантажену дільницю раніше. Використання такого підходу дає змогу мінімізувати час простою поїзда в очікуванні відправлення, однак сприятиме виникненню затримок для поїздів, які мають більш пізніший час прибуття.

У випадку, коли неможливо визначити конфліктну ситуацію за допомогою зазначених правил, для їх розподілу можна використовувати додаткові експлуатаційні показники, які відображують рівень якості здійснення перевезень (пунктуальність перевізника) або випадковий вибір визначення порядку проходження дільниць.

Критерії пріоритетності, сформовані на основі аналізу економічних показників, передбачають надання переваги у проходженні перевантаженої дільниці поїздам, які мають найвищу економічну ефективність (або найменші економічні витрати):

- загальний дохід від поїзда – обчислення рівня тарифів і зборів, загальної довжини рейсу, а

також експлуатаційних витрат на **1 ткм** для кожної конфліктної нитки. Пріоритет надають поїзду, який має найбільший сумарний дохід серед усіх поїздів;

- середня вартість простою поїзда в очікуванні відправлення – оцінювання витрат на час простою поїзда в очікуванні відправлення на перевантажену дільницю. Перевагу в русі надають поїзду, який має найбільші сумарні витрати під час очікування відправлення.

Слід зазначити, що для розподілу пропускної спроможності зазначені способи формування критеріїв пріоритетності можна використовувати як диференційовано, так і в поєднанні з іншими критеріями з метою найефективнішого вирішення конфліктів у ГПП під час розподілу пропускної спроможності на перевантажених секторах.

Функціонування процедури розподілу пропускної спроможності, побудованої на концепції використання механізму відкритих торгів (аукціонів), передбачає проведення конкурентної боротьби за організовані нитки графіка серед усіх зацікавлених стейкхолдерів. Реалізація такого процесу відбувається за допомогою критерію пріоритетності, який залежить від економічної цінності заявки (ціни пропозиції) від залізничного перевізника [15]. Вирішення конфліктів за наявну пропускну спроможність на основі відкритих торгів сприяє прозорій і конкурентній боротьбі, що забезпечує збільшення економічної ефективності від функціонування перевантаженої дільниці [16], однак може скорочувати можливості виграшу в аукціонах із боку перевізників із меншим бюджетом.

Для розподілу пропускної спроможності на перевантажених дільницях, що знаходяться на міжнародних коридорах мережі TEN-T, можуть застосовувати критерії пріоритетності, засновані на методології обчислення пріоритетності розподілу попередньо визначеної нитки графіка (англ. Pre-arranged Patch, PaP). За цим методом, показник пріоритетності (K) ґрунтується на обчисленні загальної довжини всіх секцій попередньо визначеної нитки графіка (PaP) і робочих днів на період дії графіка руху [17]. Слід зазначити, що ця концепція може бути використана для визначення пріоритетності як на міжнародних вантажних коридорах, так і в рамках національної залізничної мережі. Класифікація критеріїв пріоритетності наведена на рис. 1.

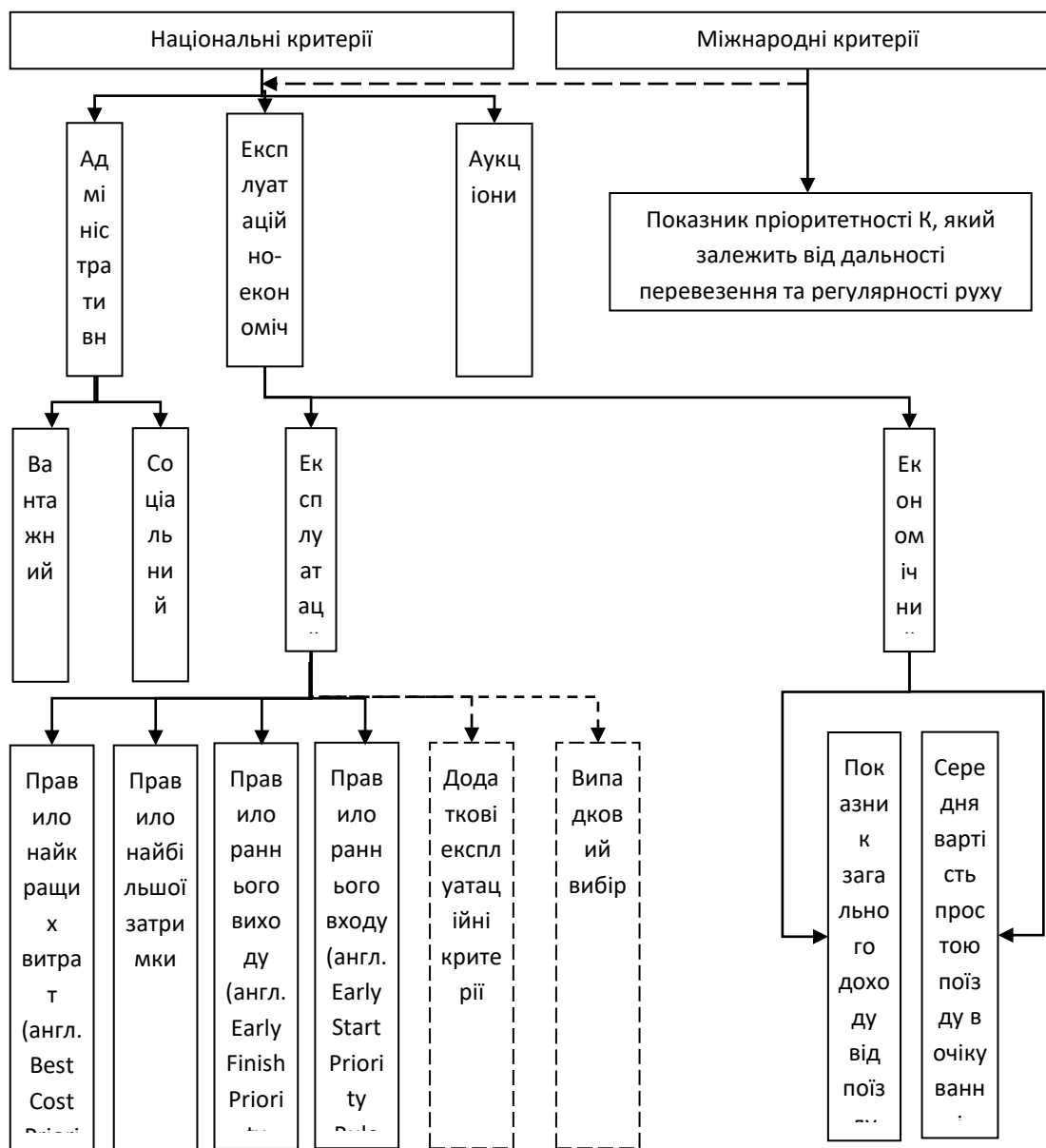


Рис. 1. Схема-класифікатор критеріїв пріоритетності для руху поїздопотоків

Важливою передумовою для успішного функціонування механізму розподілу пропускної спроможності, заснованого на процедурі пріоритизації поїздопотоків за допомогою критеріїв пріоритетності в сегменті перевантажених залізничних секцій, є встановлення основних принципів здійснення перевізного процесу на законодавчому рівні. У межах функціонування залізничних систем за європейською моделлю розподілу (вертикальний розподіл) правове регулювання перевізного процесу на перевантажених секціях здійснюється централізовано згідно з Регламентом ЄС 913/2010 [18] і Директивою 2012/34/ЄС [12], що встановлюють вимоги до операторів інфраструктури в обов'язковому розробленні

правил пріоритетності для перевантажених залізничних дільниць, які функціонують у рамках національної залізничної мережі, а також міжнародних вантажних коридорів. Процедура визначення пріоритетності має ґрунтуватися на основі критеріїв, які враховують рівень суспільної важливості залізничних послуг для населення, а також їхню класифікацію за видом перевезення. Слід зазначити, що розроблені правила пріоритетності мають бути опубліковані в «Положенні про мережу» (англ. Network Statement, NS) кожного національного залізничного перевізника.

На національному рівні країн-учасниць ЄС критерії пріоритетності визначають як централізовано, так і децентралізовано. Централізоване регулювання критеріїв

пріоритетності передбачає їх визначення одноосібно з боку держави або регулюючих органів. Критерії, встановлені з боку органів влади, є обов'язковими з боку всіх національних ІМ, що функціонують на території країни. Використання централізованого підходу у визначенні критеріїв пріоритетності унеможливило встановлення дискримінаційних умов проходження перевантаженого сектору для певних видів або типів поїздопотоків із боку ІМ, однак може не враховувати певні регіональні умови експлуатації перевантажених залізничних дільниць, де необхідно встановлення особливих умов проходження через них. Крім того, централізований підхід потребує складного бюрократичного процесу у випадках необхідності змін до вже існуючих правил пріоритетності. У свою чергу децентралізоване регулювання передбачає самостійне визначення оператором інфраструктури критеріїв пріоритетності на підпорядкованій йому залізничній мережі. Децентралізоване регулювання забезпечує більший рівень «гнучкості» під час прокладання та подальше вирішення конфліктів у ГРП за рахунок можливості самостійно встановлювати критерії пріоритетності з боку ІМ, однак значно збільшує ризики встановлення дискримінаційних критеріїв, що характерно для залізничних систем із недостатнім розвитком залізничних перевезень за моделлю відкритого доступу.

У межах функціонування міжнародних вантажних коридорів (RFC) основні критерії пріоритетності може визначати самостійно (децентралізовано) кожен орган комплексного обслуговування (C-OSS) із подальшим викладенням у спеціальному інформаційному документі про коридор (англ. The Corridor Information Document, CID) [16]. Однак, як показує практика, критерії пріоритетності більшості вантажних коридорів функціонують у рамках національних критеріїв пріоритетності країни, через яку проходить вантажний коридор.

Встановлення критеріїв пріоритетності в залізничних системах за американською моделлю розподілу (горизонтальний розподіл) відбувається централізовано з боку органів державної влади. Встановлені критерії є соціально орієнтованими, однак на практиці через особливості функціонування залізничного ринку за горизонтальним розподілом ринків, що передбачає одноособове управління залізничною інфраструктурою з боку компанії – власника колій, перевагу надають вантажному поїздопотоку свого формування, незалежно від наявності пасажирських поїздів.

У межах функціонування залізничного транспорту України критерії пріоритетності визначені централізовано з боку держави та викладені у Правилах технічної експлуатації

(ПТЕ) [20]. Ці критерії надають пріоритет пасажирським перевезенням, однак у контексті функціонування міжнародних транспортних коридорів, які проходять територією України, правове регулювання критеріїв пріоритетності на сьогодні відсутнє. Також чинною редакцією ПТЕ не визначено порядок проходження вантажного поїздопотоку через перевантажену дільницю. У табл. 1 відображені підхід для встановлення критеріїв пріоритетності за вибраними країнами з розвинутою залізничною мережею.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз законодавчої бази залізничних систем щодо встановлення критеріїв пріоритетності та класифікації підходів

Країна (оператор інфраструктури)	Підхід для встановлення критеріїв пріоритетності	Орган регулювання	Регулюючий документ	Різновид підходу
Польща (PKP PLK)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [21]	Соціальний
Німеччина (DB Netz)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [22]	Соціальний
Франція (SNCF Réseau)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [23]	Соціальний
Румунія (CFR)	Централізований	Національне законодавство	Наказ Міністерства транспорту та інфраструктури [24]	Соціальний
США	Централізований	Національне законодавство	Закон про залізничний транспорт [19]	Соціальний (на практиці - вантажний)

Україна (АТ «УЗ»)	Централізований	Національне законодавство	Правила технічної експлуатації залізниць [20]	Соціальні
-------------------------	-----------------	---------------------------	---	-----------

переважно вантажних. Ураховуючи вертикальну інтеграцію залізничної системи України, запропоновано розширити аналіз на подібні залізниці, такі як США, Канада, Індія. У межах порівняльного аналізу залізниць США була вибрана приватна вантажна залізниця CSX Transportation, на мережі якої обертаються пасажирські поїзди державної пасажирської компанії Amtrak. У табл. 2 наведені основні експлуатаційні показники залізничних систем.

Для детальнішого вивчення проблеми встановлення пріоритетності поїздопотоків у статті запропоновано проаналізувати основні показники вибраних залізничних систем і порівняти їх із залізничною системою України. Вибрано різні типи залізничних систем із вертикальним розподілом – Польща, Німеччина, Франція, Румунія та Велика Британія. Залізниці цих країн є переважно пасажирськими, тоді як залізничну систему України можна віднести до

Таблиця 2

Експлуатаційні показники залізничних систем за 2019 рік

Показник	Польща (Poland)	Німеччина (Germany)	Франція (France)	Румунія (Romania)	США (USA) CSX/Amtrak	Україна (Ukraine)	Велика Британія (UK)	Індія (India)	Канада (Canada)
Загальна довжина колій, км	19359	39068	28142	10759	32186	19799	15935	63140	46552
Частка пасажирського руху в загальних поїздокілометрах, %	68,65	77,19	86,12	73,59	66,41	25,50	94,38	65,93	19,13
Поїздокілометри пасажирські, млн поїздів	180,2	856	364,7	63,8	64,5	36,2	558,4	769	11,74
Поїздокілометри вантажні, млн поїздів	82,3	253	58,8	22,9	32,63	105,7	33,2	397	49,62
Пасажирообіг, млрд пас. км	22,07	102,90	95,95	5,23	10,99	28,41	66,80	1050,74	1,8
Вантажообіг, млрд ткм	55,91	128,70	33,77	3,76	299,73	181,84	0,02	707,67	455,8
Кількість перевезених пасажирів, млрд пас.	0,34	2,94	1,27	0,07	0,03	0,15	1,74	8,09	0,01
Кількість перевезених вантажів, млрд т	0,23	0,36	0,09	0,06	н/д	0,31	0,07	н/д	0,33
Пунктуальність вантажних поїздів, %	35,0 [25]	57,0 [25]	77 [25]	65 [25]	79 [27]	95,60*	92,60 [30]	н/д	88,40 [33]
Пунктуальність пасажирських поїздів, %	80,5 [25]	77,0 [25]	87,0 [25]	56,0 [25]	75,0 [26]	92,46 [28]	83,92 [29]	70,54 [31]	68 [32]

Примітка. * Процент вантажних поїздів, які прослідували за розкладом, н/д – нема даних.

На першому етапі проведено порівняльний аналіз залежності рівня пунктуальності руху пасажирських поїздів від вантажо- та пасажирообігу. Для наглядності аналізу побудовано діаграму бульбашкового типу (рис. 2). З аналізу діаграми на рис. 2 можна зробити висновок про значне завищення показника пунктуальності пасажирських поїздів (92,46 %) у залізничній системі України порівняно зі схожими залізницями. Залізнична система України з

показником пасажирообігу належить до систем із незначною величиною (28,41 млрд пас. км), але такі залізничні системи, як Франція, Велика Британія, Німеччина, що мають значно більші обсяги пасажирських перевезень, мають показник пунктуальності нижче 90 %. Однак залізнична система України значно перевищує європейські залізничні системи за показником вантажообігу (181,84 млрд ткм). Це досить близько до показників із залізничною системою Німеччини, яка має одну з найгірших пунктуальностей пасажирських поїздів (77,0 %) серед європейських залізниць. Залізнична система Румунії має

аномальні показники і не може бути порівняною. Показники залізничної системи Індії доводять, що в умовах значного вантажного руху пунктуальність пасажирських поїздів менше 80%. Кластер країн із значним вантажообігом має зсув вліво на діаграмі і лише залізнична система України зміщена вправо. Більш узагальнено можна провести аналіз залежності показника

пунктуальності руху пасажирських поїздів від пунктуальності руху вантажних поїздів і вантажообігу залізничних систем (рис. 3).

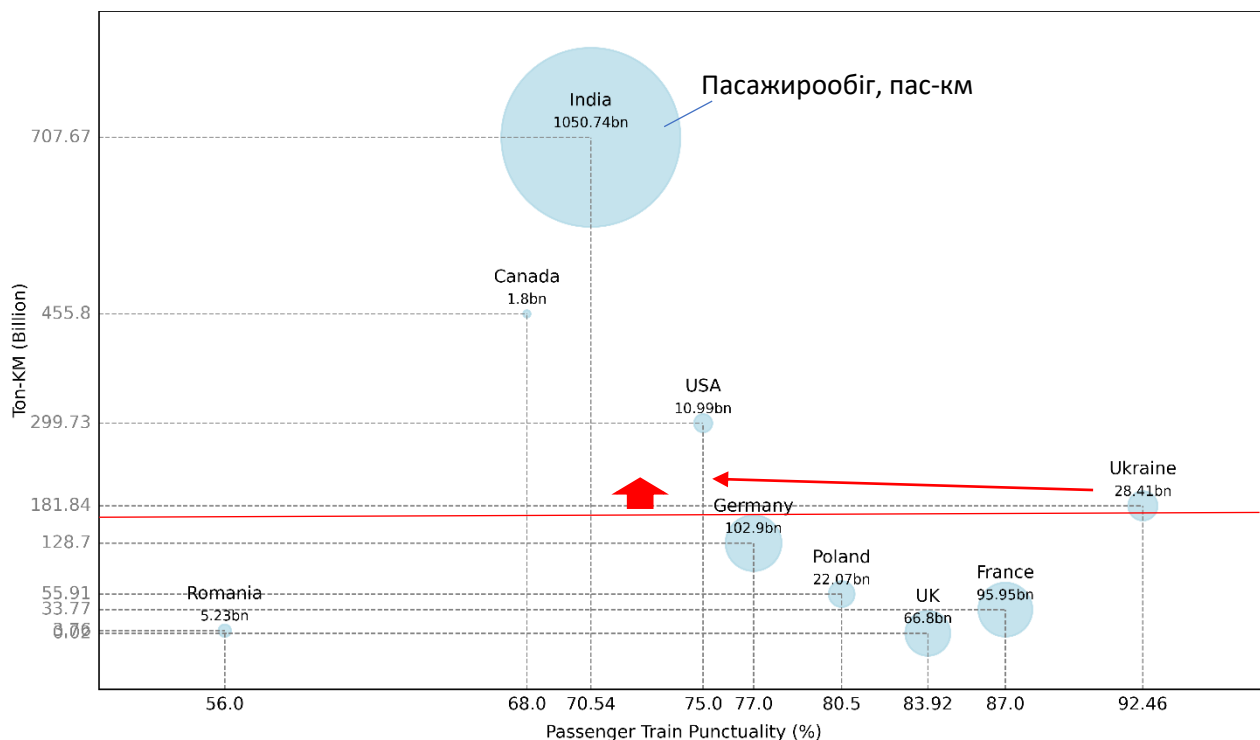


Рис. 2. Діаграма залежності показника пунктуальності руху пасажирських поїздів від вантажообігу та пасажирообігу залізничних систем

пасажирських поїздів, що спричиняє значні збитки

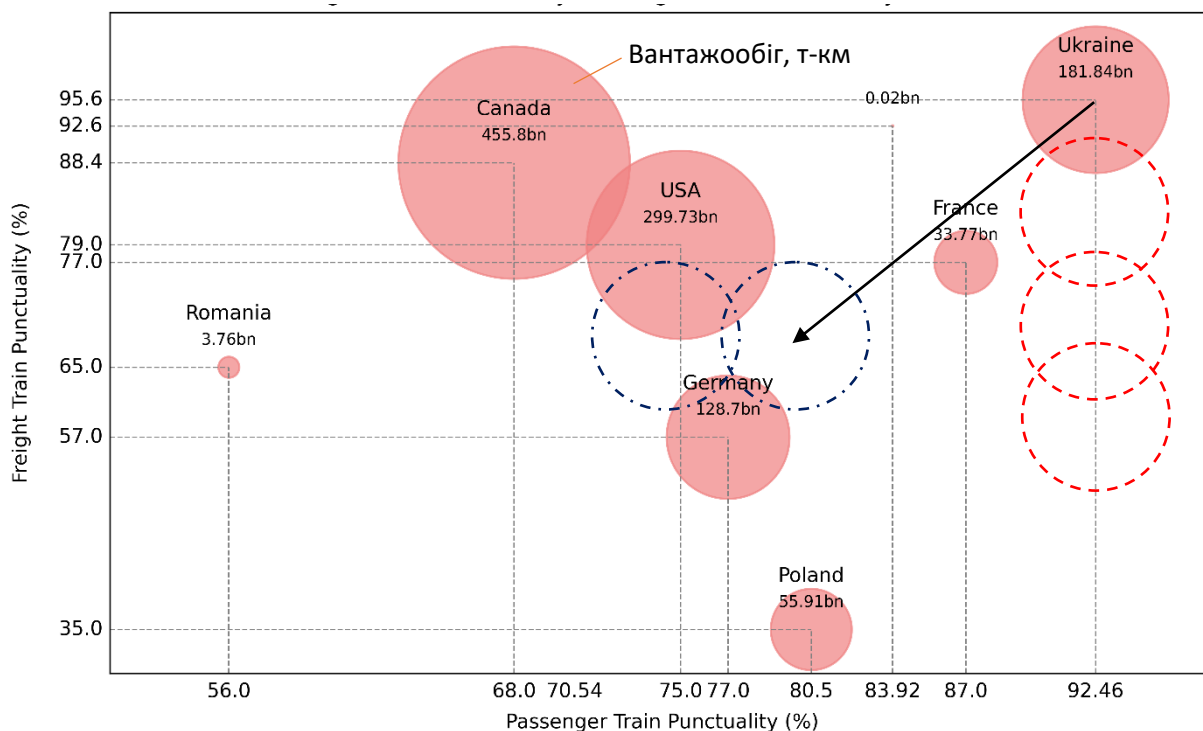


Рис. 3. Діаграма залежності показника пунктуальності руху пасажирських поїздів від пунктуальності руху вантажних поїздів і вантажообігу залізничних систем

Із діаграми на рис. 3 простежують таку залежність: чим більший вантажообіг, тим менший рівень пунктуальності пасажирських поїздів. Пунктуальність вантажних поїздів (95,6 %) була прийнята зі звітності АТ «Укрзалізниця», що й відображено на діаграмі, але, урахувавши відправлення вантажних поїздів без дотримання нормативного графіка руху, цей показник досить умовний. Для більш якісного оцінювання практичних умов експлуатаційної роботи АТ «Укрзалізниця» на діаграмі відображено червоними пунктирними колами можливі позиції України за показником рівня виконання графіка руху вантажних поїздів. Навіть зміна позиції за пунктуальністю вантажного руху чітко дає зрозуміти, що залізнична система України порушує залежність пунктуальності пасажирського руху від пунктуальності вантажних поїздів. Кола зі штрих-пунктирним синім контуром на діаграмі рис. 3 показують позиції залізничної системи України за умови дотримання описаної вище залежності. Такий аналіз доводить, що безумовний пріоритет пасажирського руху над вантажним призводить до «викривлених» властивостей залізничної системи України. Відсутність балансу між пріоритетністю руху вантажних і пасажирських поїздів призводить до занадто високого рівня виконання графіка руху

відстань (англ. Euclidean Distance) за вибраними показниками для кожної країни.

Формула розрахунку відстані для двох точок (залізниць країн) $A = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ та $B = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ у n -вимірному просторі має вигляд [26]

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2},$$

де x_i – значення i -го показника (ознаки) для залізниці країни (точки) A ;

y_i – значення i -го показника (ознаки) для залізниці країни (точки) B .

Обчислені відстані між усіма парами країн використовують для вимірювання схожості між країнами за вибраними показниками.

На другому етапі, після об'єднання двох країн в один кластер, обчислюють відстань між цим кластером та іншими країнами або кластерами за формулою Уорда для збільшення дисперсії [26]:

$$\Delta = \sum_{i \in C} \|x_i - \mu_C\|^2,$$

де C – кластер;

μ_C – центр ваги кластера (середнє значення координат);

$\|x_i - \mu_C\|^2$ – відстань точки до центра кластера. Залізничні країни або кластери об'єднують,

якщо це призводить до найменшого збільшення суми квадратів відстаней.

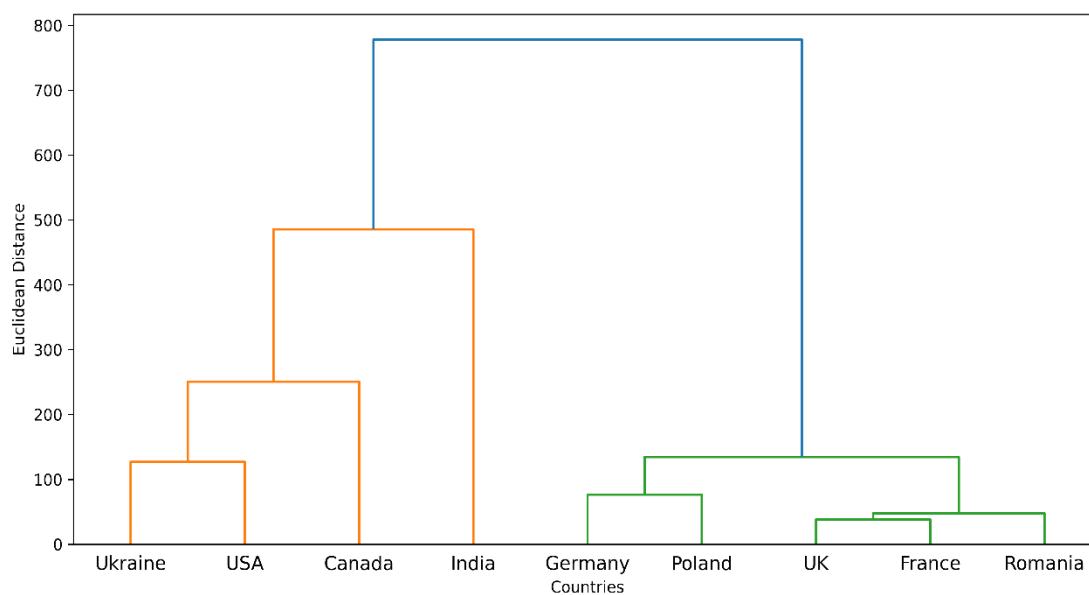


Рис. 4. Дендрограма ієрархічної кластеризації за показниками загальної довжини колій, частки пасажирських поїздокілометрів від загальних, вантажообігу, пунктуальності пасажирських поїздів для залізничних систем країн, що досліджують

Відповідно до дендрограми на рис. 4 за ієрархічною кластеризацією залізнична система України потрапляє в окремий кластер залізниць, що мають високий вантажообіг. Цей показник разом із часткою пасажирського руху від загального найбільше впливає на формування окремого кластера. Країни з помірним вантажообігом і відносно високою часткою пасажирських перевезень утворюють другий великий кластер, де Німеччина з Республікою Польща поряд, тоді як Франція подібна до Великої Британії, і вони поряд із залізничною системою Румунії. За умови додавання таких показників, як розмір мережі та вантажообіг із часткою пасажирських поїздокілометрів від загальних, залізнична система України потрапляє до кластера переважно вантажних залізничних систем із вертикальною інтеграцією. Це доводить, що показник пунктуальності пасажирських поїздів для залізничної системи України є досить аномальним. Позиція України – поряд із залізничними системами, що мають менші значення пунктуальності пасажирського руху.

Висновки. Результати дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у залізничних системах світу дали змогу виявити негативний вплив недосконалої системи пріоритизації руху поїздопотоків у залізничній системі України на ефективність її функціонування. За складеним класифікатором критеріїв пріоритетності, використуваних на

залізницях світу, доведено, що в залізничній системі України застосовують соціально орієнтований критерій. Це передбачає надання пріоритетності в русі через перевантажену дільницю пасажирським поїздам, які мають високу суспільну важливість для населення або держави, але є збитковими. У той же час аналіз законодавчої бази щодо встановлення пріоритетів руху поїздів показав, що в Україні відсутня єдина та прозора нормативна документація, що встановлює правила визначення пріоритетності руху поїздів. Пріоритет надають пасажирським поїздам, коли відсутні критерії пріоритизації вантажних поїздів. На основі порівняльного аналізу вибраних показників залізничних систем світу виявлено значно завищений показник пунктуальності (рівня виконання графіка руху) пасажирських поїздів. На основі розрахунку дендрограми ієрархічної кластеризації за методом Уорда чисельно доведено належність залізничної системи України до переважно вантажних залізниць із незначним пасажирським рухом. Виявлено, що переважання пасажирського руху викривляє властивості системи. Висунуто гіпотезу, що відсутність балансу між пріоритетністю руху вантажних і пасажирських поїздів у залізничній системі України призводить до занадто високого рівня виконання графіка руху пасажирських поїздів, що спричиняє значні збитки для вантажних перевезень. Це може пояснювати проблему щорічного потрапляння залізничної системи України в піковий період навантаження у стан

перевантаження, де виникають значні системні затори вантажних поїздів. Отримані результати і висновки дають змогу в подальшому чисельно вивчити вплив пасажирського руху на вантажний і перейти до формування вимог до правил пріоритетності, які можна використовувати під час проведення анбадлінгу в АТ «Укрзалізниця».

Список використаних джерел

1. Ait Ali A., Eliasson J. European railway deregulation: an overview of market organization and capacity allocation. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2021. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1885521> (дата звернення: 10.12.2024).
2. Gibson S. Allocation of capacity in the rail industry. *Utilities Policy*. 2003. Т. 11, № 1. P. 39–42. URL: [https://doi.org/10.1016/s0957-1787\(02\)00055-3](https://doi.org/10.1016/s0957-1787(02)00055-3) (дата звернення: 10.12.2024).
3. Boskovic B., Stojadinovic N. Train path allocation on congested railway infrastructure – Is a service priority criteria limiting development of competition? *International scientific-expert conference on railways «RAILCON'16»: матеріали Міжнар. наук. конф., 13–16 жовт. 2016 р.* URL: https://www.researchgate.net/publication/309187245_Train_path_allocation_on_congested_railway_infrastructure_-_Is_a_service_priority_criteria_limiting_development_of_competition (дата звернення: 10.12.2024).
4. Train path congestion management: Using hybrid auctions for decentralized railway capacity allocation / N. Stojadinović та ін. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2019. Т. 129. P. 123–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.013> (дата звернення: 10.12.2024).
5. RailNetEurope. Overview of priority rules in operation. *RailNetEurope*. URL: https://rne.eu/wp-content/uploads/RNE_OverviewOfthePriorityRulesInOperation.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
6. Mishra A., Kumar N., Kharb S. Priority Based Train Scheduling Method Using ACO in Indian Railway Perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 998. P. 012016. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/998/1/012016> (дата звернення: 10.12.2024).
7. Gao R., Niu H. A priority-based ADMM approach for flexible train scheduling problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Т. 123. P. 102960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102960> (дата звернення: 10.12.2024).
8. Single-track railway scheduling with a novel gridworld model and scalable deep reinforcement learning / F. Yang та ін. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Т. 154. P. 104237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104237> (дата звернення: 10.12.2024).
9. Khadilkar H. A Scalable Reinforcement Learning Algorithm for Scheduling Railway Lines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Т. 20, № 2. P. 727–736. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2829165> (дата звернення: 10.12.2024).
10. Лаврухін О. В. Визначення цільової функції пріоритетного відправлення вантажних поїздів зі станції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2011. Т. 2, № 50. С. 20–22. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/14201/1/Lavrukhin.pdf> (дата звернення: 10.12.2024).
11. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 44–54. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/21410/1/Parkhomenko.pdf>.
12. Establishing a single European railway area : Директива ЄС від 12.12.2012 р. № 2012/34/EU. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj> (дата звернення: 10.12.2024).
13. Abid M. M., Khan M. B. Scalable Optimization of Railway Schedule Using Branch and Bound Technique with Priority Rules. *Fourth International Conference on Transportation Engineering: матеріали Міжнар. наук. конф., жовт. 2013 р.* URL: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413159.459> (дата звернення: 10.12.2024).
14. Abid M. M., Khan M.B., Iqbal M. Timetable optimization for single line railway. *European Transport/Trasporti Europei*. 2015. № 58. P. 1-17. URL: https://www.researchgate.net/publication/283594728_Timetable_optimization_for_single_line_railway (дата звернення 10.12.2024).
15. Wilson W. W., Dahl B. L. Bidding on railcars for grain: a strategic analysis. *Agricultural Economics Report*. 1997. № 376. URL: https://www.researchgate.net/publication/23514306_BIDDING_ON_RAILCARS_FOR_GRAIN_A_STRATEGIC_ANALYSIS (дата звернення 10.12.2024).
16. Shymanska O. Auction theory and its practical application. *Herald of Economics*. 2021. № 1(99). P. 143. URL: <https://doi.org/10.35774/visnyk2021.01.143> (дата звернення: 17.12.2024).
17. Прохорченко А. В. Залізничні системи з вертикальним розділенням. Європейська модель. Дніпро: Ліра, 2022. 316 С.

18. Concerning a European rail network for competitive freight. Регламент ЄС від 20.10.2010 р. № 913/2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010R0913> (дата звернення: 10.12.2024).
19. 49 USC 24308: Use of facilities and providing services to Amtrak. *OLRC Home*. URL: <https://uscode.house.gov/view.xhtml?req=granuleid:USC-2000-title49-section24308&num=0&edition=2000#:~:text=%24308.,on%20which%20the%20parties%20agree> (дата звернення: 10.12.2024).
20. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України: Наказ М-ва трансп. України від 20.12.1996 р. № 411: станом на 1 січ. 2004 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text> (дата звернення: 10.12.2024).
21. Network Statement 2023/2024 - PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. *PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.* URL: <https://en.plk-sa.pl/for-customers-and-partners/the-rules-for-allocating-train-paths/network-statement-2023/2024> (дата звернення: 10.12.2024).
22. Network Statement 2025. *DB InfraGO: Eisenbahninfrastruktur der Zukunft in Deutschland*. URL: https://www.dbinfrago.com/web-en/rail-network/network_statement/Network-Statement-2025-12612778 (дата звернення: 10.12.2024).
23. Network Statement of the National Rail Network - Timetable 2025. *SNCF Réseau*. URL: <https://www.sncf-reseau.com/fr/drr/network-statement-national-rail-network-timetable-2025> (дата звернення: 10.12.2024).
24. ORDIN 1165 10/07/2012 - Portal Legislativ. *Pagina de start - Portal Legislativ*. URL: <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocument/139591> (дата звернення: 10.12.2024).
25. European Commission adopts 8th report on development of the rail market. *Mobility and Transport*. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-adopts-8th-report-development-rail-market-2023-09-27_en (дата звернення: 10.12.2024).
26. Amtrak On-Time Performance Trends and Hours of Delay by Cause. *Bureau of Transportation Statistics*. URL: <https://www.bts.gov/content/amtrak-time-performance-trends-and-hours-delay-cause> (дата звернення: 10.12.2024).
27. CSX Transportation. Annual report. 2019. 138 p. URL: <https://s2.q4cdn.com/859568992/files/annual/2019-CSX-Annual-Report.pdf> (дата звернення: 10.12.2024).
28. АТ «Укрзалізниця». Річний інтегрований звіт за 2019 рік. Київ, 2019. 120 с.
29. Passenger rail performance. *ORR Data Portal*. URL: <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/performance/passenger-rail-performance/> (дата звернення: 10.12.2024).
30. Freight rail usage and performance. *ORR Data Portal*. URL: <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/usage/freight-rail-usage-and-performance> (дата звернення: 10.12.2024).
31. Government Of India Rail Mantralaya Ministry Of Railways (Railway Board). Annual report & Accounts of Indian Railways. 2020. 179 p. URL: https://assets-global.website-files.com/5d70c9269b8d7bd25d8b1696/6406eae7a095b56be697ec50_RFGR3GqUFCX0k3kXki5T-95hc-Wdfj1V6hsj2MwMiwY.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
32. Via Rail Canada. Annual report. 2019. 142 p. URL: https://media.viarail.ca/sites/default/files/publications/2019%20VIA%20RAIL%20AR_ENGLISH.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
33. CN's marching orders to the tune of a new operating model seem simple, but perfecting the steps isn't. *Progressive railroading*. URL: <https://www.progressiverailroading.com/canadian-national/article/CNs-marching-orders-to-the-tune-of-a-new-operating-model-seem-simple-but-perfecting-the-steps-isnt--70396> (дата звернення: 10.12.2024).
34. Дослідження стабільності руху поїздопотоків на вантажонапружених залізничних полігонах / М. А. Кравченко, С. Стебницька, А. В. Прохорченко. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2022. Вип. 199. С. 99-113. DOI: 10.18664/1994-7852.199.2022.258820.
35. Ward J. H., Jr. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *Journal of the American Statistical Association*. 1963. 58. P. 236-244.

Andrii Prokhorchenko, Dmytro Kharchenko, Andrii Kyman, Mykhailo Kravchenko Ihor Zhukovytsky
RESEARCH ON TRAIN FLOW PRIORITIZATION RULES IN RAILWAY SYSTEMS

Abstract. *In conditions of capacity deficits within the railway network, it is crucial to develop mechanisms to avoid overloading elements of the railway system. One approach to preventing overload is the establishment of transparent and efficient prioritization rules. Under such circumstances, research aimed at defining requirements for prioritization rules is relevant, ensuring that, in accordance with operational conditions, the railway system's capacity deficit can be mitigated. The purpose of this study is to investigate train flow prioritization rules in various railway systems*

worldwide to identify patterns, challenges, and effective practices in setting priorities. These insights aim to enhance or develop new prioritization rules that will improve the operational efficiency of Ukraine's railway system. According to a developed classifier of prioritization criteria used in railways globally, it has been proven that Ukraine's railway system employs a socially oriented criterion. An analysis of the legislative framework for setting train movement priorities revealed the absence of unified and transparent normative documentation in Ukraine to regulate prioritization rules. Priority is given to passenger trains, while criteria for prioritizing freight trains are lacking. Based on a comparative analysis of selected indicators from global railway systems, an excessively high punctuality rate (schedule adherence level) of passenger trains was identified in Ukraine's railway system. Using hierarchical clustering analysis with Ward's method, the numerical classification of Ukraine's railway as predominantly freight-oriented with limited passenger operations was confirmed. It was found that the existing priority given to passenger traffic distorts the system's properties. A hypothesis was proposed that the imbalance in prioritization between freight and passenger train movements in Ukraine's railway system leads to an excessively high schedule adherence rate for passenger trains, resulting in significant losses for freight transportation. The results obtained can be used in the management of Ukraine's railway system to enhance its operational efficiency.

Keywords: railway system, capacity, congested infrastructure, train flow, prioritization, punctuality.

Прохорченко Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Тел.: +38 (066) 635-76-01. E-mail: prokhorchenko@kart.edu.ua.

Харченко Дмитро Романович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел.: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Киман Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. E-mail: uermp@kart.edu.ua.

Кравченко Михайло Анатолійович, доктор філософії, докторант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: m.kravchenkourf@gmail.com.

Жуковицький Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Електронні обчислювальні машини, Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

Prokhorchenko Andrii Volodymyrovych, Dr. Tech. Sciences, Professor, Professor of the Department of Operations Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Tel.: +38 (066) 635-76-01. Email: prokhorchenko@kart.edu.ua.

Kharchenko Dmytro Romanovych, Postgraduate student of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Tel.: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Kyman Andrii Mykolayovych, PhD, Associate Professor of Freight and Commercial Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Tel.: +38 (057) 730-10-75. Email: uermp@kart.edu.ua.

Kravchenko Mykhailo Anatoliyovych, PhD, Doctoral candidate of the Department of Operations Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Tel.: +38 (057) 730-10-88. Email: m.kravchenkourf@gmail.com.

Ihor Zhukovytsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Dnipro Institute of Infrastructure and Transport, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.