



Управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах і шляхи підвищення ефективності

Розглянуто проблеми управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах: оптимізацію процесів транспортування з урахуванням технічних, організаційних та інфраструктурних факторів. Запропоновано універсальну математичну модель, яка враховує час простою вагонів, витрати локомотивогодин, митні процедури і витрати на паливо. Проаналізовано ефективність застосування різних математичних методів, таких як лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування. У статті надано практичні рекомендації з удосконалення управлінських процесів і зменшення затримок за перевезень. Результати сприяють підвищенню ефективності залізничних вантажних перевезень і покращенню міжнародної логістики.

Ключові слова: управління вагонопотоками, оптимізація залізничної логістики, пропускна спроможність прикордонних станцій, планування графіка руху поїздів, вантажні залізничні перевезення, міжнародні транспортні коридори, інтеграція інформаційних систем у залізничний транспорт, обробка вагонопотоків, оптимізація руху вантажних потягів, моделювання залізничних операцій.

локомотивних бригад і технічні аспекти обслуговування вагонів.

Вступ.

Міжнародні залізничні перевезення – важливий компонент світової транспортної інфраструктури, що забезпечує ефективний обмін товарами між країнами та регіонами. Однією з основних складових цього процесу є організація вагонопотоків, що має велике значення для забезпечення своєчасності, безпеки та економічної ефективності перевезень. Оскільки кількість вантажних перевезень постійно зростає, зокрема через розширення міжнародної торгівлі, оптимізація вагонопотоків стає важливим завданням для залізничних компаній та операторів.

В останні роки на залізничному транспорті спостерігають тенденцію до впровадження новітніх технологій для управління логістичними процесами, що включають інтеграцію автоматизованих систем моніторингу, прогнозування та планування перевезень. Успішне управління вагонопотоками дає змогу не тільки знижувати витрати, але й підвищувати якість обслуговування, скорочуючи час простою вагонів і зменшуючи навантаження на інфраструктуру.

У статті розглянуто основні підходи для управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах і запропоновано шляхи підвищення ефективності цього процесу з використанням сучасних математичних моделей, інноваційних технологій та управлінських стратегій. Зокрема, увага зосереджена на аналізі факторів, які впливають на оптимізацію перевезень, таких як затримки на прикордонних станціях, часові обмеження на роботу

Постановка проблеми дослідження.

Залізничний транспорт відіграє важливу роль у міжнародних перевезеннях вантажів, зокрема через свою спроможність транспортувати великі обсяги товарів на значні відстані з високою надійністю і ефективністю. Водночас організація вагонопотоків на міжнародних маршрутах є складним завданням, що потребує врахування численних факторів, які впливають на ефективність перевезень. Однією з головних проблем є оптимізація управління вагонопотоками, що включає мінімізацію часу простою вагонів, скорочення затримок на прикордонних станціях, ефективне використання локомотивних бригад і технічне обслуговування вагонів [2, 3].

Проте, незважаючи на значний прогрес у розвитку залізничної інфраструктури та використання новітніх технологій для моніторингу й управління логістичними процесами, існує потреба в удосконаленні методів організації вагонопотоків, зокрема в умовах складних міжнародних перевезень. Важливою проблемою є також необхідність узгодження планів перевезень між різними залізничними адміністраціями та адаптація до змінних умов, таких як сезонні коливання попиту, зміни тарифної політики, зміни у вантажному потоці та геополітичні фактори.

Це дослідження спрямоване на розроблення ефективних підходів і оптимізаційних стратегій для управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, ураховуючи обмеження та виклики, що виникають у реальному часі.

Для вирішення цієї проблеми необхідно впровадити математичні моделі, що дають змогу максимально ефективно використовувати наявні ресурси, зменшувати витрати і підвищувати загальну ефективність процесів у міжнародних перевезеннях залізничним транспортом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В Україні питання оптимізації залізничних перевезень, зокрема управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, є важливою темою для досліджень. Останнім часом зростає кількість публікацій, присвячених використанню математичних моделей і технологій для покращення логістичних процесів у залізничному транспорті.

Дослідження підтверджують важливість застосування математичних методів для оптимізації руху вагонів, зокрема шляхом розроблення оптимальних графіків і зменшення часу простоїв на станціях. Виділено специфіку міжнародних перевезень і труднощі, що виникають на прикордонних станціях, де врахування особливостей митних процедур є критично важливим для управління вагонопотоками.

Сучасні автоматизовані системи управління демонструють ефективність моніторингу та контролю руху вагонів. Вони дають змогу мінімізувати затримки, скоротити витрати часу і знизити вплив людського фактора. Застосування таких систем особливо важливе для забезпечення безперервності міжнародних перевезень і координації логістичних процесів.

Покращення інфраструктури залізничних станцій і застосування технологій прогнозування значно підвищують ефективність перевезень. Урахування попиту, сезонних змін і можливих затримок через погодні чи технічні фактори дає змогу адаптувати планування маршрутів, знижуючи ризики збоїв у графіках. Використання великої кількості даних є перспективним інструментом для оптимізації цих процесів.

Економічні фактори також суттєво впливають на організацію міжнародних перевезень. Оптимізація маршрутів, зменшення витрат на паливо й час, що витрачають на перетин кордонів, є ключовими аспектами для підвищення ефективності логістики. Використання стратегій зниження витрат і впровадження енергоефективних технологій сприяє стабільності залізничних перевезень у сучасних умовах.

Цей аналіз свідчить про постійний розвиток українських досліджень у сфері оптимізації вагонопотоків на залізничному транспорті, а також наявність значних зусиль у напрямі автоматизації та інтеграції прогнозних технологій для підвищення ефективності міжнародних перевезень.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета дослідження полягає в удосконаленні методів управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, спрямованих на підвищення ефективності перевезень. Це включає розроблення оптимізаційних моделей, які враховують різні фактори, що впливають на якість логістичних операцій, і пошук шляхів для зменшення витрат і підвищення надійності роботи залізничного транспорту. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути основні аспекти організації вагонопотоків на міжнародних залізничних маршрутах з урахуванням особливостей роботи прикордонних станцій;

- розробити універсальну модель для оптимізації управлінських процесів з урахуванням різних факторів, які впливають на ефективність руху вагонів;

- оцінити ефективність застосування різних математичних підходів для вирішення проблем управління вагонопотоками, зокрема за допомогою сучасних методів прогнозування і оптимізації;

- визначити ключові фактори, які можуть покращити або ускладнити управління вагонопотоками, і розробити рекомендації з їх урахування у практиці.

Ці завдання дають змогу заглибитися в питання вдосконалення процесів перевезень, підвищення їхньої ефективності та усунення наявних проблем у роботі міжнародних залізничних сполучень.

Виклад основного матеріалу.

Організація вагонопотоків на міжнародних залізничних маршрутах – складний процес, що включає низку логістичних, технічних і адміністративних аспектів. Одним із ключових етапів цього процесу є ефективне управління рухом вагонів на прикордонних станціях, де перетинаються різні національні транспортні системи та інфраструктури. Це потребує детального планування та узгодження між різними країнами і залізничними адміністраціями.

Основні аспекти організації вагонопотоків:

- міжнародні транспортні коридори. Залізничні маршрути міжнародного сполучення часто включають транскордонні перевезення, де важливо забезпечити безперешкодне та своєчасне переміщення вантажів через кордони. Це передбачає використання спільних технічних стандартів, забезпечення безпеки та уникнення затримок, що виникають через митні формальності;

- прикордонні станції та їхні особливості. Прикордонні станції відіграють ключову роль у

забезпеченні пропускання поїздів між різними країнами. Тут перевіряють вантажі, змінюють локомотиви, а також відбувається координація між залізничними службами різних країн. Особливо важливою є організація операцій з перевантаження вантажу або зміни вагонів на станціях, що можуть бути обмежені пропускнуою спроможністю;

- митний контроль і перевірка документів. Після прибуття поїзда на прикордонну станцію проводять митний контроль, перевірку документації та телеграм: відповідність вантажів, митні формальності, надання дозволів для подальшого руху. Процес може бути затриманий через необхідність виконання кількох перевірок, що потребує координації з митними органами обох країн;

- планування часу обробки поїздів. Для уникнення затримок важливо чітко спланувати час виконання кожної операції на прикордонній станції – це не тільки сама обробка поїздів, але й час на виконання митних процедур, зміну локомотивів і виконання технічних оглядів;

- механізми управління вагонопотоками. Ураховуючи важливість швидкості і точності перевезень, необхідно застосовувати ефективні методи планування та управління вагонопотоками, що включають використання інформаційних систем для прогнозування руху вагонів, моніторингу виконання операцій і автоматизації процесів [6, 7].

Прикордонні станції є специфічними ділянками міжнародних залізничних маршрутів. Вони мають ураховувати технічні та організаційні вимоги обох країн, що можуть бути різними. Наприклад, для станцій, розташованих на

кордонах Європейського Союзу, характерна необхідність виконання додаткових процедур із перевірки документів і вантажів, що може збільшити час на проходження митного контролю.

Також слід зазначити, що багато прикордонних станцій мають обмежену пропускну спроможність, що може призвести до затримок, особливо за найбільших навантажень. Зміна локомотивів, перевірка вантажів і підготовка супровідної документації потребують чіткої координації між службами різних країн, а також відсутності технічних збоїв в інфраструктурі.

Увесь процес обробки поїздів на прикордонних станціях складається з кількох етапів, кожен із яких має важливе значення для загальної ефективності: операції зі збору інформації про поїзд, перевірка відповідності документації, митний контроль, зміна локомотивів, технічне обслуговування та відправлення поїзда.

Ураховуючи ці аспекти, технологічний графік, що відображує весь процес обробки поїзда на прикордонній станції, є важливим інструментом для забезпечення безперебійної роботи і ефективності руху вагонопотоків на міжнародних маршрутах.

Наступний етап – технологічний графік (рис. 1) обробки вантажного поїзда на прикордонній станції, який дасть змогу наочно продемонструвати послідовність операцій і час, необхідний для їх виконання, а також візуалізує розподіл часу між основними етапами роботи прикордонної станції.

Технологічний графік обробки вантажного поїзда на прикордонній станції

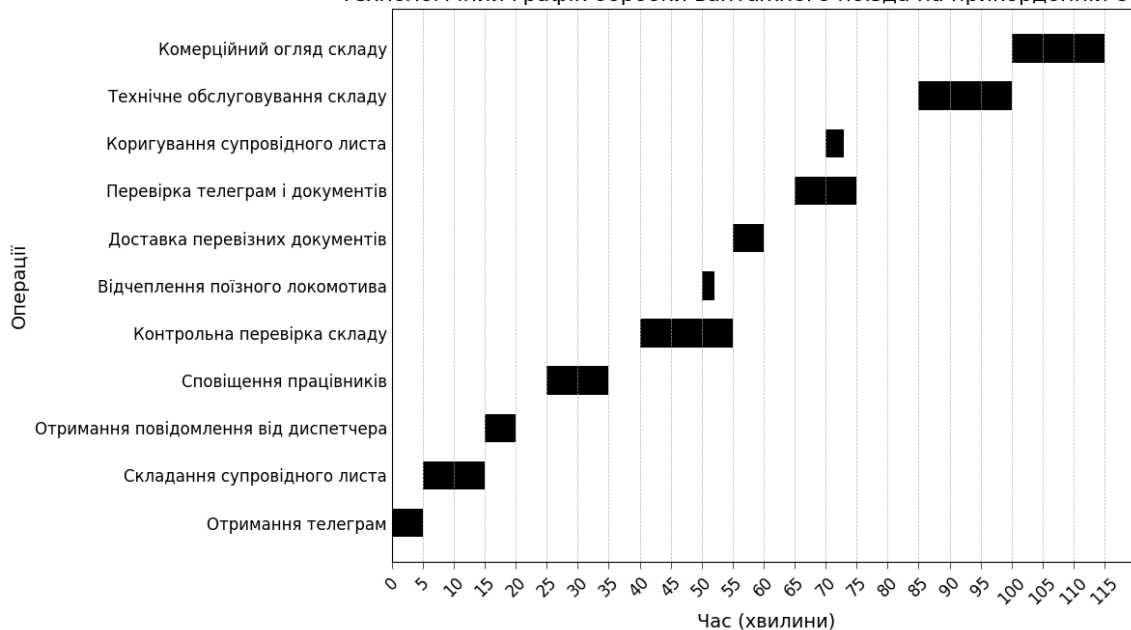


Рис. 1. Технологічний графік обробки вантажного поїзда

на прикордонній станції

Розроблення універсальної моделі для оптимізації управлінських процесів.

Управління вагонопотоками є ключовим елементом ефективної роботи залізничного транспорту, зокрема на міжнародних маршрутах [4, 5]. Основний аспект цього завдання – забезпечення безперебійного, швидкого та ефективного руху вантажних поїздів між різними країнами, ураховуючи обмеження інфраструктури, митні процедури, час обробки вантажів і локомотивів, а також інші специфічні фактори. Для досягнення цієї мети необхідне розроблення універсальної моделі з урахування численних змінних і оптимізації процесів управління.

Основні фактори, що впливають на ефективність руху вагонів:

1. Технічні обмеження інфраструктури.

Пропускна спроможність залізничних станцій, особливо прикордонних, визначає швидкість обробки поїздів. Мережі, що межують між різними країнами, часто мають різні стандарти колії, швидкості і типи локомотивів. Зміна локомотивів або обмеження на швидкість руху впливають на загальний час транспортування.

2. Митні процедури та документообіг.

Важливими є митні процедури та перевірки на прикордонних станціях. Поїзди можуть бути затримані, що впливає на загальний час обробки вантажів. Важливим є прогнозування часу митного оформлення та оптимізація таких операцій.

3. Координація між різними транспортними системами.

Узгодження графіків руху, обробка документів і контроль на прикордонних станціях потребують чіткої взаємодії різних залізничних адміністрацій і митних органів.

4. Випадкові фактори та непередбачувані затримки.

Технічні неполадки, погодні умови, затори на станціях або помилки в документообігу спричиняють затримки, що впливають на ефективність. Модель має враховувати такі ситуації.

5. Формування цільової функції.

Оптимізація управління передбачає максимізацію ефективності системи, ураховуючи витрати вагоногодина, використання локомотивів, час простою, витрати пального та інших ресурсів:

$$\max F = w_1 \cdot \frac{1}{Z_{\text{ваг}}} + w_2 \cdot \frac{1}{Z_{\text{лок}}} + w_3 \cdot \frac{1}{T_{\text{простій}}} - w_4 \cdot C_{\text{паливо}}$$

(1)

$$Z_{\text{ваг}} = \sum_i (T_{\text{пр. } i} \cdot V_i)$$

$$Z_{\text{лок}} = \sum_i (T_{\text{лок}} \cdot N_{\text{лок}})$$

$$T_{\text{простій}} = \sum_i T_{\text{пр. } i}$$

$$C_{\text{паливо}} = \sum_k (L_k \cdot P_k)$$

де $Z_{\text{ваг}}$ – загальні витрати вагоногодина;

$Z_{\text{лок}}$ – витрати часу роботи локомотивів;

$T_{\text{простій}}$ – час простою вагонів;

$C_{\text{паливо}}$ – витрати на паливо;

w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, що задають пріоритети.

Далі наведені обмеження для розробленої цільової функції (1).

Баланс вагонів на прикордонній станції:

$$\sum_j R_{ij} + V_i = O_i + S_i,$$

де O_i – вагони, відправлені з прикордонної станції i ;

S_i – залишок вагонів на станції.

Час роботи локомотивної бригади

$$T_{\text{лок}} \leq T_{\text{доп.}}$$

Пропускна спроможність станції

$$V_i \leq C_{\text{макс } i},$$

де $C_{\max i}$ – максимальна кількість вагонів, яку може обробити станція i .

Час простою вагонів

$$T_{\text{пр. } i} = T_{\text{відп. } i} - T_{\text{поч. } i},$$

де $T_{\text{поч } i}$ – час прибуття вагонів;

$T_{\text{відп } i}$ – час їх відправлення.

Ліміт відправлень із технічної станції

$$\sum_j R_{ij} \leq C_{\text{техн. } j},$$

де $C_{\text{техн } j}$ – місткість технічної станції j .

Місткість прикордонної станції

$$S_i + V_i \leq C_{\text{прикордонна } i},$$

де $C_{\text{прикордонна } i}$ – місткість прикордонної станції.

Витрати пального локомотивів

$$C_{\text{паливо}} = \sum_k (L_k \cdot P_k),$$

де P_k – витрати пального на одиницю пробігу;

L_k – пробіг локомотива k .

Урахування реального часу.

Для моделювання динамічних змін використовують t -залежні функції:

$$V_i(t), T_{\text{пр. } i}(t), S_i(t).$$

Прогнозування потоку вагонів ґрунтовано на історичних даних із моніторингом затримок.

Оцінювання ефективності застосування різних математичних підходів для вирішення проблем управління вагонопотоками, зокрема за допомогою сучасних методів прогнозування і оптимізації, подано на рис. 2 у вигляді гістограми порівняння різних математичних підходів, таких як лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування [1].

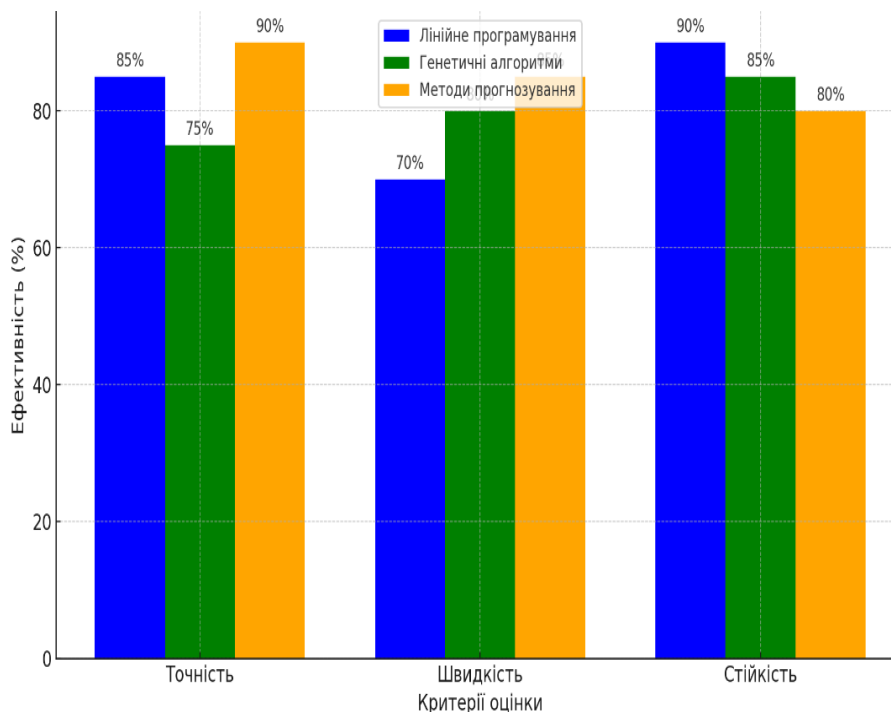


Рис. 2. Гістограма порівняння різних математичних підходів, таких як

лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування

Для перевірки роботи розробленої цільової функції було використано один із методів оптимізації — лінійне програмування. Мета —

максимізувати значення розробленої цільової функції з урахуванням її компонентів. Результат розрахунку подано як графік на рис. 3.

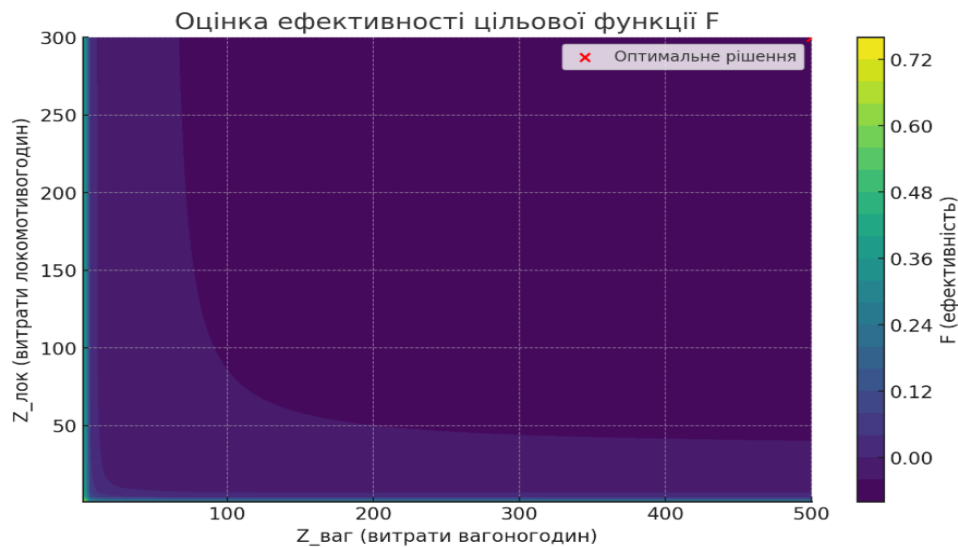


Рис. 3. Оцінювання ефективності розробленої цільової функції

Лінійне програмування виявило оптимальні значення параметрів, які забезпечують максимізацію функції ефективності. Графік ілюструє залежність функції від витрат вагоно- і локомотивогодин. На графіку також позначено оптимальну точку червоним маркером.

Можна зробити висновок, що з використанням лінійного програмування ми досягаємо оптимального розподілу ресурсів для управління вагонопотоками з заданими обмеженнями.

Переваги запропонованої моделі:

- комплексність: урахування всіх головних факторів, що впливають на ефективність вагонопотоків;
- гнучкість: можливість адаптації до змін режимів роботи станцій і міжнародних маршрутів;
- автоматизація: інтеграція з інформаційними системами для моніторингу та оптимізації в реальному часі.

Ця модель може бути застосована для аналізу технологічного графіка обробки вантажного поїзда, що дає змогу візуалізувати взаємозв'язок між різними операціями. Технологічний графік стане частиною аналітичного інструментарію для оцінювання ефективності управління на прикордонних станціях, а також ухвалення рішень з оптимізації ресурсів і часу.

Також до переваг цієї моделі можна віднести зниження затримок, покращення використання інфраструктури, оптимізацію

маршрутів, скорочення витрат на паливе, покращення координації, взаємодію між різними адміністраціями та органами контролю.

Розроблена універсальна модель є важливим інструментом для підвищення ефективності міжнародних залізничних перевезень, оптимізації використання ресурсів і забезпечення надійності логістичних процесів.

Для ефективного управління вагонопотоками необхідно враховувати кілька головних аспектів. Технічна інфраструктура обмежена пропускною спроможністю станцій, різницею в стандартах колії і станом обладнання. Доцільно модернізувати інфраструктуру, використовувати багатосистемні локомотиви та регулярно обслуговувати техніку.

Митні процедури часто викликають затримки через повільний документообіг і тривалі перевірки. Для їх покращення слід упроваджувати цифрові системи документообігу, спростувати процедури та застосовувати сучасні технології.

Координація між транспортними системами ускладнена через відсутність єдиного графіка руху і недостатню інтеграцію інформаційних систем. Важливо забезпечити централізоване управління та інтеграцію даних для кращої синхронізації.

Непередбачувані фактори, такі як погодні умови, аварії та помилки, потребують ефективного управління ризиками, прогнозування затримок і підвищення кваліфікації персоналу.

Економічні аспекти, зокрема зростання витрат на ресурси, потребують оптимізації витрат і залучення державної підтримки. Технологічні

можливості, зокрема автоматизація і штучний інтелект, створюють умови для кращого моніторингу та управління.

Висновки.

Оптимізація управління вагонопотоками є важливим завданням залізничної галузі для підвищення ефективності транспортної системи. Дослідження аналізує математичні підходи, які допомагають мінімізувати витрати часу, ресурсів і пального, водночас забезпечуючи продуктивність.

Математичні моделі, такі як лінійне програмування і генетичні алгоритми, сприяють оптимізації розподілу вагонів і зменшенню простоїв. На ефективність управління впливають технічний стан інфраструктури, цифровізація і координація між системами. Використання автоматизації, штучного інтелекту і аналізу даних підвищує точність прогнозів і допомагає уникати затримок.

Загалом дослідження підкреслює важливість системного підходу для управління вагонопотоками з урахуванням сучасних технологій і математичних методів. Реалізація запропонованих підходів і рекомендацій дасть змогу не лише покращити ефективність роботи залізничної галузі, але й створити фундамент для її сталого розвитку в умовах зростаючих транспортних потреб.

Список використаних джерел

1. Modeling and Optimization of International Rail Freight Transport Flows Using Linear Programming / J. Novak et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. Vol. 136. P. 101922. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922> (date of access: 10.11.2024).
2. Digital Technologies for Cross-Border Railway Operations Management / M. Bergmann et al. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 181. P. 563–570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.154> (date of access: 10.11.2024).
3. Optimization Approaches for Rail Freight Transport: Addressing Border Delays / T. Rodrigues et al. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2019. Vol. 9. No. 2. P. 72–83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.12.002> (date of access: 10.11.2024).
4. Impact of Infrastructure Constraints on International Freight Rail Transport / F. Chen et al. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 350–359. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.042> (date of access: 10.11.2024).
5. The Role of Machine Learning in Railway Traffic Flow Optimization / K. Müller et al. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 209. P. 118092. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.118092> (date of access: 10.11.2024).
6. Рибальченко Л. І. Визначення цільової функції оптимізації використання порожнього парку вагонів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Вип. 6/3 (60). С. 25-27.
7. Рибальченко Л. І., Франковський Д. В. Оптимізація використання порожніх вагонів в умовах дефіциту рухомого складу. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 145. С. 69-72.

Rybalchenko Liliia

MANAGEMENT OF WAGON FLOWS ON INTERNATIONAL RAILWAY ROUTES AND WAYS TO IMPROVE EFFICIENCY

Abstract. The optimization of wagon flows is a critical objective for the railway industry, particularly in the context of increasing demands for transport efficiency. This study explores mathematical approaches to modeling and optimizing wagon flows to minimize time, resource, and fuel consumption while maintaining high system productivity.

The research highlights the efficacy of advanced mathematical models such as linear programming, genetic algorithms, and predictive modeling in achieving optimal wagon allocation, reducing idle times, and enhancing locomotive performance. These approaches are shown to be effective tools for addressing complex challenges in wagon flow management.

Key factors affecting wagon flow management are identified, including the technical condition of infrastructure, integration of information systems, weather conditions, documentation speed, and economic constraints. By addressing these factors through the adoption of modern technologies and enhanced coordination between transportation systems, their negative impacts can be mitigated.

The study underscores the critical role of digitalization in streamlining wagon operations. The integration of automated management systems and digital platforms for data monitoring and analytics improves decision-making speed and accuracy. Technologies such as artificial intelligence, machine learning, and big data analysis enable real-time prediction of delays and optimization of routes, enhancing the resilience and adaptability of the transportation system.

Practical recommendations are provided to improve wagon flow management. These include investing in infrastructure modernization, fostering

international cooperation, integrating advanced information systems, and adopting environmentally sustainable and energy-efficient technologies. These measures aim to boost the efficiency of railway operations and lay the groundwork for sustainable development in the face of growing transportation needs.

The findings emphasize the importance of a systematic approach to wagon flow management, leveraging modern technologies and mathematical methodologies. Implementing these approaches and recommendations will not only improve the efficiency of the railway sector but also support its sustainable growth by addressing contemporary challenges in transportation. This study offers a comprehensive framework for optimizing wagon flows, contributing to the broader objective of enhancing global transport systems.

Keywords: wagon flow management; rail logistics optimization; border station capacity; train schedule planning; rail freight transportation; international transport corridors; integration of information systems into rail transport; wagon flow processing; freight train movement optimization; railway operations modeling.

Рибальченко Лілія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail:

rybalchenko@kart.edu.ua. ORCID ID
<https://orcid.org/0000-0003-3585-624X>.

Rybalchenko Liliia, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:
rybalchenko@kart.edu.ua. ORCID ID
<https://orcid.org/0000-0003-3585-624X>.