

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

---

УДК 656.222.6

### УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ МАРШРУТАМИ В НАПРЯМКУ ЗАХІДНИХ КОРДОНІВ УКРАЇНИ

Кандидати техн. наук А. О. Ковальов, Г. С. Бауліна, Г. Є. Богомазова,  
аспіранти І. В. Керницький., Є. А. Мигалатій

### IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF CARGO TRANSPORTATION BY ROUTES IN THE DIRECTION TO THE WESTERN BORDERS OF UKRAINE

PhD (Tech.) A. Kovalov, PhD (Tech.) H. Baulina, PhD (Tech.) H. Bohomazova,  
postgraduates I. Kernytskyi, Ye. Myhalatii

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296786>



***Анотація.** У роботі досліджено процес переміщення вагонопотоків з експортними вантажами в сучасних умовах функціонування залізничного транспорту України. Виявлено основні західні прикордонні переходи, обсяги перевезень і види вантажів, що направляються у країни ЄС. Запропоновано технологію планування перевезення вантажів маршрутами, яка дає можливість раціонально керувати перевізним процесом за умови відправлення поїздів за фіксованим розкладом, що узгоджується з розкладом іноземного перевізника. Використання такої технології дасть змогу зменшити обіг вагонів, час їхнього перебування на прикордонних передавальних станціях обох суміжних держав, отже, усунути додаткові витрати залізниці через нераціональний простій вагонів. Крім того, технологія враховує множинну випадків затримки маршруту за фіксованим розкладом. Величину затримки поїзда визначено за допомогою застосування теорії нечітких множин.*

***Ключові слова:** залізничний транспорт, маршрутний поїзд, західний кордон, експортні перевезення вантажів, затримка поїзда.*

***Abstract.** The paper examines the process of movement of carloads with export goods in the modern conditions of railway transport of Ukraine. In the conditions of a full-scale war, after blocking the ports, the export transportation of goods takes place largely through the western border crossings. The volumes of cargo transportation passing through the western border stations, which have been increasing recently, were studied. Bulk cargo, such as grain, iron ore, ferrous metals, and others, is a significant part of cargo transported in the direction of the western borders to the EU countries or in transit through their territory. The transportation of such cargoes is usually organized as part of route trains, since the large volume of the load allows full trains to be accumulated. The technology of planning the transportation of goods by routes is proposed, which makes it possible to rationally manage the transportation process, provided that trains are dispatched according to a fixed schedule that is consistent with the schedule of the foreign carrier. A model of stochastic programming with optimization of operational costs arising in the process of formation and routing of a route train in the direction of the western borders has been developed. The developed model takes into account the probabilistic nature of the formation time of the route train at the loading station, which is subject to the normal distribution law. To ensure the practical*

*implementation of the model, the technological and regulatory conditions reflected in the system of restrictions are taken into account. The use of the proposed technology will make it possible to avoid the processing of wagons in the process of transportation, increase the productivity of rolling stock by reducing the turnover of wagons, optimize the technology of planning the transportation process, and also increase the predictability of cargo shipments for shippers. In addition, the technology takes into account multiple cases of route delays on a fixed schedule. Determining the amount of train delay is solved using the theory of fuzzy sets. Taking into account the received data on the places of delays and their causes, it is necessary to lay time reserves on the route of freight trains moving according to a fixed schedule.*

**Keywords:** railway transport, route train, western border, export cargo transportation, train delay.

**Вступ.** Українська економіка набагато в чому залежить від міжнародної торгівлі. Україна, посідаючи одне з ключових місць на глобальному аграрному ринку, забезпечує експортне постачання суттєвих обсягів продовольства. Наприклад, середньорічний сумарний експорт за останні довоєнні три сезони лише чотирьох ключових товарів – кукурудзи, пшениці, соняшникової олії та соняшникового шроту – оцінюється в 58,1 млн т, що становить понад 14 % сумарного світового експорту зазначених товарів. При цьому для кукурудзи та пшениці середньорічна частка українського експорту в загальному обсязі світової торгівлі оцінюється як 15 та 10 % [1]. Протягом останніх трьох сезонів до 2022 року Україна стабільно посідала четверте і п'яте місця в рейтингу світових експортерів кукурудзи та пшениці. Зростання показників виробництва зерна і відповідно нарощування обсягів експорту свідчили про зростання значущості країни на світовій арені.

До повномасштабного вторгнення на територію України понад 60 % українського експорту здійснювалося через морські порти. Однак у 2022 році постачання більшості українських вантажів було перервано через блокаду українських портів. Проте Україні за підтримки міжнародних організацій вдалося відновити перевезення вантажів, змінивши при цьому логістичний маршрут у бік Євросоюзу. Отже, вантажоперевезення України зазнали значних змін. Вантажі почали прямувати

територією України майже повністю залізничним транспортом у бік європейських країн, переважна більшість з яких – до найближчих країн, що мають виходи до морської навігації, оскільки це найкоротші маршрути і відповідно найдешевші. У той же час нові логістичні маршрути призвели до нових проблем. Однак не тільки Україні довелося зіткнутися з низкою проблем при зміні логістичних маршрутів у бік західних кордонів і блокадою морських портів. Такі зміни торкнулися міжнародного ринку, нашої держави, морського транспорту, а також і залізничного.

Водночас швидко стало зрозуміло, що ні українська, ні європейська залізнична інфраструктура не були готові до прийняття та обробки наявного обсягу вантажів з України. На залізниці виникли додаткові витрати через простой вагонів у черзі на кордоні України з Європейським Союзом (ЄС) і нездатність транзитних залізничних станцій обробити вагонопотік, що виріс. До того ж малі залізничні термінали на території Євросоюзу, різна ширина залізничних колій в Україні та Європі, початкова відсутність інтеграції між залізничними структурами України та сусідніх країн, а також нестача вагонів у європейських залізничних перевізників спричинили низку проблем у залізничній транспортній системі, що потребують невідкладного вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чимало наукових досліджень

присвячено технології планування, формування составів поїздів, моделюванню залізничних вантажних перевезень при застосуванні різних математичних методів з урахуванням певних параметрів функціонування залізничної системи. Так, для отримання безконфліктної схеми планування та маршрутизації поїздів як у макро-, так і мікрозалізничних мережах визначено спільну оптимізацію проблеми планування та маршрутизації поїздів за допомогою пов'язаної структури моделювання просторово-часових мереж з кількома дозволами [2]. У запропонованій моделі враховувався ряд необхідних обмежень безпеки та вагонопотоку в мережах з різною роздільною здатністю. Для кращого планування руху поїздів у роботі [3] сформовано модель управління пропускною спроможністю, що розподіляє поїзди маршрутами на основі статистичного очікування часу руху, щоб збалансувати залізничний рух. Найкращі початкові маршрути і час відправлення поїздів зі станцій відправлення та в'їзду до мережі, ураховуючи витрати часу на шляху прямування, визначено на основі генетичного алгоритму. Для вирішення завдань одночасної оптимізації маршруту вагона та планування формування поїзда в дослідженні [4] пропонується модель двійкового нелінійного програмування, яка враховує різні експлуатаційні вимоги і обмеження пропускної спроможності та дає змогу мінімізувати загальні витрати на накопичення, формування поїздів і транспортування.

Автори статті [5] зазначають, що визначення оптимальної кількості вагонів у поїзді для окремого маршрутного перевезення можливе при використанні математичної моделі, яка базується на використанні статистичних даних роботи АТ «Укрзалізниця» і враховує всі важливі фактори відносин вантажовласника і залізниці. У роботі [6] розроблено модель формування ступінчастих маршрутів при перевезенні зерна, яка дає змогу визначити

оптимальну кількість вагонів у маршрутному составі. Застосування моделі забезпечить скорочення непродуктивних простоїв рухомого складу та виключення переробки в процесі перевезення.

У дослідженні [7] виконано порівняльний аналіз організації прямування вагонів до пункту призначення при використанні сучасної технології та «за жорсткою ниткою» графіка руху поїздів приватним локомотивом, що доводить доцільність застосування приватної локомотивної тяги для здійснення перевезень контейнерних поїздів. Процес переміщення рухомого складу на напрямку, що враховує можливі ризики при перевезенні вантажу, досліджено в роботі [8]. Виявлено основні причини, що ведуть до виникнення ефекту першої та останньої милі, а саме відсутність необхідної кількості технічно справного рухомого складу у встановлені терміни та істотні труднощі з пропусканням поїздів, зокрема, через припортові та прикордонні станції.

Підхід до вивчення впливу особливостей експлуатації поїздів і станцій на затримки, спричинені порушеннями та перебоями в інтермодальних вантажних залізничних перевезеннях розглянуто у статті [9]. Результати дослідження показують, що вага та довжина поїзда, кількість TEU, вага одного вагона, відстань між станціями є ключовими характеристиками для прогнозування затримок і це розуміння може бути використане для оптимізації вантажних операцій Національної залізничної компанії Люксембурга. Авторами статті [10] досліджено можливості для глобальних ланцюгів постачання товарів на основі так званого нового «Шовкового шляху», який з'єднує Китай із Європою. Основними проблемами, які з'являються на шляху прямування вантажів, є обмеження потужностей через вузькі місця в інфраструктурі та відсутність функціональної сумісності залізниць різних країн. Такі самі труднощі виникають і при

транспортуванні вантажів з України до країн ЄС.

У роботі [11] запропоновано модель маршрутизації з обмеженою пропускною здатністю залізничної мережі, що дає змогу зробити висновки про витрати, пов'язані з навантаженням інфраструктури. Автори пропонують п'ять сценаріїв зміни маршрутів прямування вагонів у короткі терміни і показують вартісну залежність через такі дії. Але запропонована модель базується на повагонних відправленнях залізницею Німеччини, не враховуючи можливість прямування вагонів у міжнародному сполученні. Включення інших європейських країн може продемонструвати подальший потенціал такої моделі.

У секторі автомобільних вантажних перевезень висока фрагментація ринку викликала серйозну проблему неефективного транспортного планування та порожнього пробігу, що призвело до негативних наслідків, таких як збільшення вартості доставки. Тому в роботі [12] основну увагу приділено горизонтальному транспортному співробітництву, у якому група конкуруючих компаній, тобто вантажовідправників, перевізників або одержувачів погоджується співпрацювати. Це називається спільними транспортними мережами. У більшості сценаріїв співробітництва компанії (партнери) повинні ділитися інформацією про свої транспортні замовлення та рухомий склад із центральним координатором, наприклад постачальником логістичних послуг. Така організаційна структура та модель оперативного управління і підтримки прийняття рішень може мати багато проблем і перешкод, але при врахуванні ризиків використання запропонованої технології може дати додатковий прибуток учасникам перевезень і підвищити функціонування транспортної мережі в цілому. Зображені принципи можуть бути використані при застосуванні кільцевих маршрутів на залізничному транспорті.

Гіпотеза дослідження [13] полягає в детальному розгляді процесу накопичення вагонів з урахуванням прибуття окремих груп вагонів, визначенні варіантів вантажних поїздів з фіксованим графіком руху та обґрунтуванні аналітичних залежностей, що визначають вартість перевезення, вагоно-годин для накопичення поїздів і отримання на цій основі нових наукових результатів. Їхнє практичне використання полягає в більш точному та обґрунтованому нормуванні часу простою вагонів при накопиченні, а також уточненні методики розрахунку плану формування поїздів. При цьому в роботі не враховано можливість появи стохастичних процесів на транспорті.

У статті [14] запропоновано комплексну модель оптимізації плану формування поїздів із використанням як одногрупних, так і двогрупних поїздів на основі китайської залізничної мережі з використанням гібридного генетичного алгоритму і табу-пошуку. Модель спрямована на досягнення максимальної економії вагоно-годин на станціях за рахунок заміни одногрупних поїздів на двогрупні, що мають свої технічні переваги.

Отже, питанню удосконалення організації перевезення вантажів залізничним транспортом приділено багато уваги як в Україні, так і за кордоном. Однак проблема удосконалення технології перевезення експортних вантажів маршрутами в сучасних умовах ще потребує суттєвих досліджень.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є формування технології планування перевезення вантажів маршрутами, яка дає можливість раціонально управляти перевізним процесом, що здійснюється за фіксованим розкладом, з урахуванням затримок у процесі доставляння вантажів у напрямку західних кордонів. Для реалізації зазначеної мети було поставлено та вирішено такі завдання:

- проаналізовано показники експортних перевезень вантажів у напрямку західних кордонів;

- сформовано оптимізаційну модель технології планування перевезення вантажів у складі маршрутних поїздів для якісного управління перевізним процесом, що організовано за фіксованим розкладом;

- визначено величину затримки, що впливає на своєчасність надходження маршруту до західного кордону для передавання вантажу іноземному перевізнику.

**Основна частина дослідження.** В умовах повномасштабної війни після блокування портів експортно-імпортні перевезення вантажів переважно

відбуваються через західні прикордонні переходи, де ключову роль відіграє саме залізничний транспорт. Експортні перевезення в цьому напрямку у 2022 р. склали близько 34 млн т (рис. 1), що більше на 10 млн т порівняно з 2021 р. Збільшився експорт зернових вантажів у країни Європейського Союзу і склав у 2022 р. 33,2 % в загальній структурі експорту зерна. До 2022 р. через сухопутні шляхи було перевезено лише 2 % експорту зернових. Через залізничні прикордонні переходи між Україною та Польщею у 2022 р. було передано 16,9 млн т вантажів, що на 4,5 млн т, або на 36,7 %, більше, ніж за 2021 р.

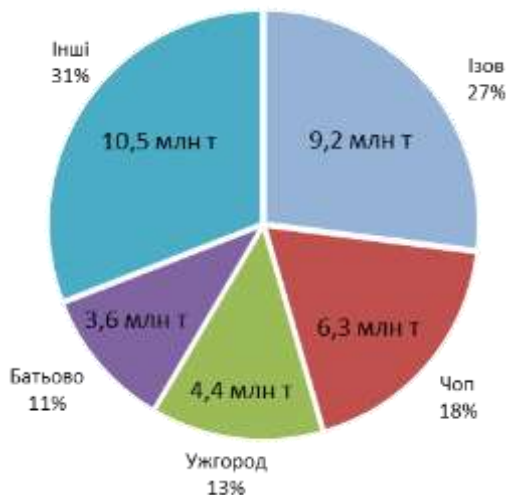


Рис. 1. Діаграма обсягів експортних перевезень вантажів через західні прикордонні станції за 2022 р.

Значну частку вантажів, що перевозяться в напрямку західних кордонів до країн Європейського Союзу (ЄС) або транзитом їхньою територією складають навалочні вантажі, такі як зерно, руда залізна, чорні метали тощо (рис. 2). Перевезення таких вантажів, як правило, організовується у складі маршрутних поїздів, оскільки великий обсяг навантаження дає змогу накопичувати

повносоставні поїзди. Крім того, підвищення маршрутизації перевезень – один із способів підвищення продуктивності вагонів. Це пов'язано зі звільненням від переробки мінімум однієї технічної станції, завдяки чому підвищується транзитність поїздопотоків, збільшується швидкість їхнього пересування.

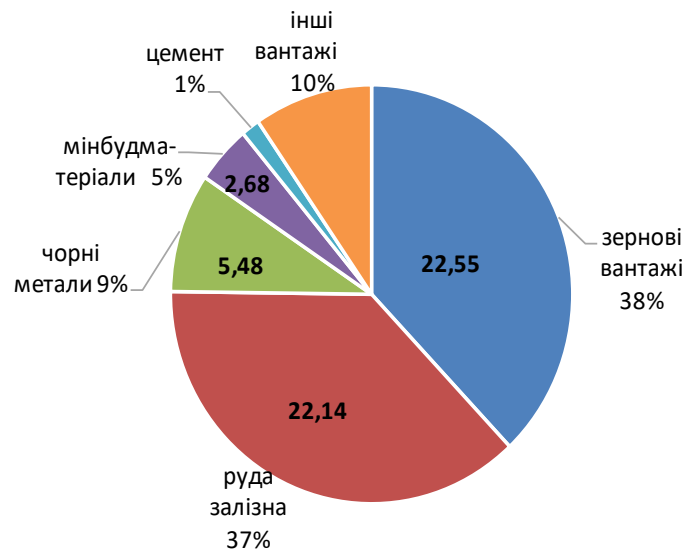


Рис. 2. Діаграма розподілу обсягів перевезення різних видів вантажів (млн т) в експортному сполученні за 2022 р.

На сьогодні залізничні перевезення вантажів маршрутами та вагонними відправками здійснюються «за готовністю», що дає змогу перевезти більший обсяг вантажів мережею, а також задіяти велику кількість малопотужних станцій навантаження. Проте при цьому зменшується прогнозованість точного терміну доставки вагонів до кордону для передання вантажів з колії шириною 1520 мм на європейську колію шириною 1435 мм. Саме це ускладнює процес виконання перевезень у країні ЄС, тому що європейські вантажні поїзди прямують за фіксованим розкладом. У зв'язку з цим іноземний перевізник на кордоні приймає вантажі за своїм узгодженим планом відповідно до розкладу руху поїздів. Проте АТ «Укрзалізниця» не має можливості підводити до кордону вагони в необхідний час, у зв'язку з чим збільшується час простою вагонів на прикордонних передавальних станціях і підходах до них, що веде до підвищення витрат залізниці. Чітка організація роботи залізниць суміжних країн забезпечить для української залізниці більш сприятливі умови для залучення додаткових обсягів експортно-імпортних вантажів [15]. Тому для вирішення зазначеної проблеми пропонується здійснювати організацію

прямування маршрутних поїздів при дотриманні фіксованого розкладу. Таку систему організації перевезення вантажів доцільно використовувати при стабільних обсягах навантаження на станціях відправлення навантаженого маршруту саме при перевезенні зерна, руди та чорних металів. Зі збільшенням вагонів, задіяних у перевезенні вантажів за розкладом руху маршрутних поїздів, за дослідженням [16], в елементі обігу вагона – простій вагона на технічних станціях – дає змогу значно скоротити загальний обіг вагона. Існує значний позитивний вплив такої технології також і на скорочення простою вагона під вантажними операціями.

Так виникає завдання оптимізації технології планування перевезення вантажів маршрутами, що дає можливість раціонально управляти перевізним процесом. Пропонується відправляти маршрути за узгодженим розкладом з іноземним перевізником. Як критерій оптимізації необхідно обрати експлуатаційні витрати, що виникають при реалізації процесу формування та прямування маршрутного поїзда в напрямку західних кордонів. Цільову функцію, що відповідає обраному критерію, можна подати в такому вигляді:

$$F(n_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t_{\text{форм}} e^{-\frac{(t_{\text{форм}} - \bar{t}_{\text{форм}})^2}{2\sigma^2}} dt_{\text{форм}} \frac{F_{\text{форм}}}{n_m} + \frac{t_{\text{прям}} F_{n.\text{зод}} n_m}{t_{\text{дост}} Q_{\text{пр.зод}}} + \frac{t_{\text{пов}} F_{\text{пов}}}{n_m} + F_3 \cdot \omega(X) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $n_m$  – состав маршрутного поїзда, ваг;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення випадкової величини від її математичного очікування  $\bar{t}_{\text{форм}}$ ;

$t_{\min}, t_{\max}$  – мінімальний і максимальний час перебування вагонів під формуванням состава маршрутного поїзда відповідно, год;

$t_{\text{форм}}$  – час формування состава маршрутного поїзда, год;

$F_{\text{форм}}$  – витрати на формування состава маршрутного поїзда, грн/год;

$t_{\text{прям}}$  – час прямуювання маршрутного поїзда, год;

$F_{n.\text{зод}}$  – витрати при прямуюванні маршрутного поїзда за фіксованим розкладом, грн/ваг;

$t_{\text{дост}}$  – тривалість доставки вантажу до західного кордону України, год;

$Q_{\text{пр.зод}}$  – пропускна здатність напрямку, ваг;

$t_{\text{пов}}$  – час на повернення порожніх вагонів, год;

$F_{\text{пов}}$  – витрати, пов'язані з поверненням порожніх вагонів, грн/год;

$F_3$  – витрати, пов'язані з можливими затримками вагонів, що виникають у процесі формування та переміщення маршрутного поїзда, грн/ваг;

$\omega(X)$  – нечітка функція, що відображує множину випадків затримки маршруту ( $X$ ) за фіксованим розкладом.

Перша складова цільової функції відображує витрати на станції формування маршруту, що виникають при здійсненні маневрових операцій з подавання та

прибирання вагонів на вантажні fronti підприємств, накопиченні состава та очікуванні початку виконання технологічних операцій. Проведені дослідження довели, що час формування маршруту  $t_{\text{форм}}$  має стохастичний характер.

Для його найкращого відображення запропоновано використання функції щільності розподілу, пов'язаної з нормальним законом розподілу. Другий доданок моделює витрати, пов'язані з прямуюванням маршрутного поїзда за фіксованим розкладом з урахуванням часу перебування вагонів на прикордонній станції. Третій доданок відповідає витратам, пов'язаним із поверненням порожніх вагонів. Остання складова цільової функції відображує витрати, пов'язані з можливими затримками вагонів, що виникають у процесі формування та переміщення маршрутного поїзда.

Для забезпечення практичної реалізації задачі необхідно враховувати обмеження, які накладаються на керуючу змінну та параметри запропонованої оптимізаційної моделі:

$$\begin{cases} n_m q_{\text{ст}} + Q_{\text{лок}} + n_m q_m \leq Q_m \\ n_m \leq m_m \\ n_m \leq L_k \\ t_{\text{форм}} \leq t_{\text{норм}} \\ t_{\text{прям}} \leq t_{\text{дост}} \\ V_m \leq V_{\text{доп}} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $q_{\text{ст}}$  – статичне навантаження вагона, т/ваг;

$Q_{\text{лок}}$  – вага поїзного локомотива, т;

$q_m$  – маса тари вагона, т/ваг;

$Q_m$  – норма маси маршрутного поїзда брутто, т;

$m_m$  – максимальний состав маршрутного поїзда, ваг;

$L_k$  – довжина приймально-відправних колій станцій відправлення та призначення, ваг;

$t_{норм}$  – нормативний час формування состава маршрутного поїзда, год;

$V_m$  – швидкість прямування маршрутного поїзда, км/год;

$V_{дон}$  – допустима швидкість прямування поїздів на певному напрямку, км/год.

Перше обмеження встановлює умову, за якої маса маршрутного поїзда не має перевищувати максимально допустиму норму маси маршруту на цьому напрямку. Состав сформованого маршрутного поїзда має відповідати максимальному составу та довжині приймально-відправних колій станцій, що зазначено у двох наступних умовах. Четверте обмеження визначає дотримання умови щодо відповідності часу формування состава нормативному часу. Наступне обмеження встановлює, що час прямування маршрутного поїзда не має перевищувати встановлений розкладом час доставки вантажу до західного кордону. Остання умова обмежує переміщення маршруту з перевищенням допустимої швидкості.

Для забезпечення ефективної діяльності та комплексного розвитку залізничної галузі необхідно враховувати певні фактори, що впливають на транспортні операції [17]. У процесі перевезення вантажів можуть виникати затримки на різних його стадіях, які необхідно враховувати при плануванні маршруту в міжнародному сполученні за

фіксованим розкладом. На величину затримки маршруту впливає ряд незалежних параметрів (причин затримки поїзда), тому її доцільно віднести до класу слабо структурованих задач і розв'язувати за допомогою застосування методів нечіткої логіки.

Нечітка підмножина  $A$  визначається як множина упорядкованих пар  $A = \{\mu_A(x)/x\}$ , де  $\mu_A$  – функція належності, що набуває значення в певній цілком упорядкованій множині  $M$ , яка дорівнює  $M = [0,1]$ . Функція належності вказує ступінь належності елемента  $x$  підмножині  $A$  [18].

Множину випадків затримки маршруту за фіксованим розкладом можна подати у вигляді п'яти найрозповсюдженіших причин збоїв у процесі перевезення вантажних поїздів

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, M = [0;1], \quad (3)$$

де  $x_1$  – затримка поїзда через пошкодження інфраструктури;

$x_2$  – затримка поїзда при відправленні зі станції формування;

$x_3$  – затримка по прибуттю на прикордонну передавальну станцію;

$x_4$  – затримка поїзда на шляху прямування;

$x_5$  – затримка через людський фактор.

Формалізацію процедури визначення часу затримки маршрутного поїзда за фіксованим розкладом можна подати у вигляді нечітких змінних:  $\langle x_1, T_1, A \rangle$ ,  $\langle x_2, T_2, B \rangle$ ,  $\langle x_3, T_3, C \rangle$ ,  $\langle x_4, T_4, D \rangle$ ,  $\langle x_5, T_5, K \rangle$ . Відтворення нечітких змінних набувають вигляду

$$\langle x_1, T_1, A \rangle \rightarrow \langle \text{"Пошкодження інфраструктури"}, T_1, [a_{\min}, a_{\max}] \rangle, \quad (4)$$



де  $T_1 = \{ \text{"до 30 хвилин"}, \text{"в межах години"}, \text{"понад 1 годину"} \};$

$a_{\min}, a_{\max}$  – діапазон значень  $A = \{a\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда через пошкодження інфраструктури у зв'язку з воєнними діями.

$$\langle x_2, T_2, B \rangle \rightarrow \langle \text{"По відправленню"}, T_2, [b_{\min}, b_{\max}] \rangle, \quad (5)$$

де  $T_2 = \{ \text{"до 10 хвилин"}, \text{"від 10 до 30 хвилин"}, \text{"понад 30 хвилин"} \};$

$b_{\min}, b_{\max}$  – діапазон значень  $B = \{b\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда при відправленні зі станції формування маршруту у зв'язку зі збоями та несправностями технічних засобів, збоїв технологічних процесів у вантажовідправника.

$$\langle x_3, T_3, C \rangle \rightarrow \langle \text{"По прибуттю"}, T_3, [c_{\min}, c_{\max}] \rangle, \quad (6)$$

де  $T_3 = \{ \text{"до 30 хвилин"}, \text{"в межах години"}, \text{"понад 1 годину"} \};$

$c_{\min}, c_{\max}$  – діапазон значень  $C = \{c\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда за фіксованим розкладом на прикордонній передавальній станції.

$$\langle x_4, T_4, D \rangle \rightarrow \langle \text{"На шляху прямування"}, T_4, [d_{\min}, d_{\max}] \rangle, \quad (7)$$

де  $T_4 = \{ \text{"за розкладом"}, \text{"можливо за розкладом"}, \text{"поза розкладом"} \};$

$d_{\min}, d_{\max}$  – діапазон значень  $D = \{d\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує час надходження маршруту на стикову передавальну станцію через можливість затримки поїзда на шляху прямування.

$$\langle x_5, T_5, K \rangle \rightarrow \langle \text{"На шляху прямування"}, T_5, [k_{\min}, k_{\max}] \rangle, \quad (8)$$

де  $T_5 = \{ \text{"незначний"}, \text{"середній"}, \text{"значний"} \};$

$k_{\min}, k_{\max}$  – діапазон значень  $K = \{k\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує час затримки через можливість нестачі кваліфікованих кадрів, задіяних у перевізному процесі.

Формалізацію комплексу процедур визначення можливих затримок при просуванні маршрутного поїзда за узгодженим розкладом з іноземним перевізником зображено через набір функцій належності з відповідними параметрами.

Можливість відправлення маршрутного поїзда з урахуванням всіх

затримок на українській залізниці можна подати як лінгвістичну змінну  $\langle X, T, Y, G, M \rangle$ , при цьому  $T$  – термножина або множина значень, що являють собою імена нечітких змінних, областю визначення кожної з яких є множина  $Y$ ;  $G$  – синтаксична процедура, що дає змогу

оперувати елементами терм-множини  $T$ , зокрема генерувати нові терми (значення);  $M$  – семантична процедура, що дає змогу перетворити кожне нове значення

лінгвістичної змінної, утвореної процедурою  $G$ , у нечітку змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

$$\langle X, T, Y, G, M \rangle \rightarrow \langle \text{"Затримка"}, T, [y_{\min}, y_{\max}] \rangle, \quad (9)$$

де  $T$  – терм-множина, яка включає узагальнюючі дані всіх можливих затримок, і набуває вигляду  $T = \{ \text{"незначна"}, \text{"допустима"}, \text{"значна"}, \text{"велика"} \}$ ;

$y_{\min}, y_{\max}$  – діапазон значень  $Y = \{y\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину затримки поїзда за фіксованим розкладом з урахуванням усіх можливих простоїв, що впливають на своєчасність надходження маршруту до прикордонної передавальної станції.

На основі масиву нечітких даних було згенеровано модель у вигляді системи нечіткого виводу, яка моделює величину затримки. На рис. 3 наведено терм-множину вихідної змінної, побудовану в середовищі Matlab. Завдяки застосуванню методів нечіткої логіки визначено величину затримки, що впливає на своєчасність

надходження маршруту до західного кордону для передання вантажу іноземному перевізнику. Ураховуючи отримані дані про місця затримок і причини їх виникнення, необхідно закладати резерви часу на маршруті вантажних поїздів, що рухаються за фіксованим графіком.

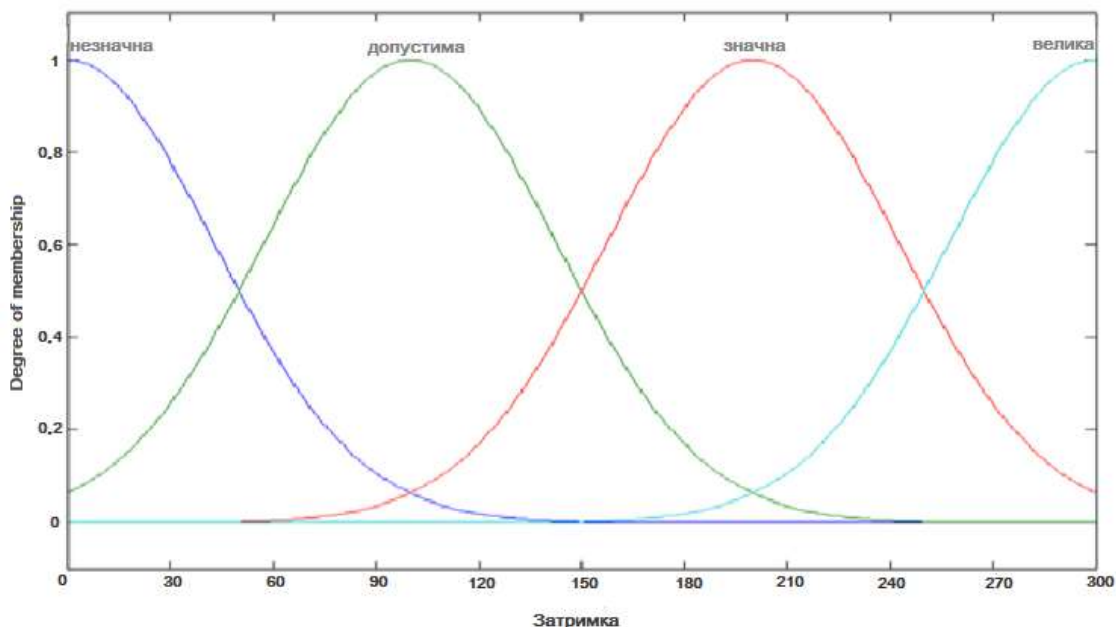


Рис. 3. Відображення лінгвістичної змінної затримки поїзда

У результаті моделювання доведено, що існує екстремум цільової функції типу мінімум, що дає змогу сформувати процедуру оптимального управління параметрами перевезення. З урахуванням величини затримки та системи обмежень найменші експлуатаційні витрати склали 6147,80 грн/ваг при прямуванні 54 вагонів у маршрутному поїзді на відстань 593 км. При цьому загальний час перевезення вантажів у маршрутному поїзді в напрямку західного кордону України склав 81 год (або 3,375 доби) з урахуванням операцій, пов'язаних з відправленням і прибуттям вагонів і їхнім перебуванням на прикордонній станції. У результаті розрахунків отримано зменшення експлуатаційних витрат майже на 8 % порівняно з чинною технологією перевезення вантажів маршрутами «за готовністю» (6633,48 грн/ваг). Скорочення витрат було отримано за рахунок зменшення часу простою вагонів на 12 %.

Розроблену модель можна вважати достатньо універсальною за своєю структурою і використовувати її при перевезенні масових навалочних вантажів маршрутами за фіксованим розкладом. При цьому будуть змінюватися тільки параметри моделі, що залежать від особливостей формування маршрутного поїзда, виконання маневрових, вантажних операцій, його схеми курсування та місцевих умов. Така модель дає змогу управляти процесом перевезення вантажів у складі маршрутного поїзда до західного кордону з найменшими експлуатаційними витратами перевізника, яким виступає залізниця. Сформовану модель доцільно інтегрувати до автоматизованих систем управління суб'єктів перевізного процесу.

Отже, використання запропонованої технології управління процесом формування та руху маршруту за фіксованим розкладом до західного кордону України дасть змогу уникнути обробки вагонів у процесі перевезення, зменшити час їхнього перебування на

прикордонних передавальних станціях обох суміжних держав, підвищити продуктивність рухомого складу за рахунок скорочення обігу вагонів, оптимізувати технологію планування перевізного процесу з урахуванням розглянутих затримок, а також збільшити прогнозованість відвантажень вантажів для вантажовідправників. Крім того, буде забезпечена узгоджена та ритмічна робота підприємств-вантажовідправників, станцій, ділянок залізниць і вчасне доставлення вантажів до кордону, синхронізація подальших перевантажувальних операцій і ниток графіка руху вантажних поїздів з іноземними перевізниками.

**Висновки.** У роботі досліджено експортні перевезення вантажів та встановлено, що на сьогодні вони переважно відбуваються через західні прикордонні переходи. Західний кордон України став основним логістичним коридором. Значну частину вантажів, що перевозяться до країн Європейського Союзу або транзитом по їхній території, складають навалочні вантажі, такі як зерно, руда залізна та чорні метали. Перевезення таких вантажів розглядається у складі маршрутних поїздів, що будуть прямувати за фіксованим розкладом для уникнення ускладнень у процесі виконання перевезень у країні ЄС.

За таких умов сформовано модель стохастичного програмування з оптимізацією технології планування перевезення вантажів маршрутами при дотриманні фіксованого розкладу з урахуванням можливих затримок, яка дає можливість раціонально управляти перевізним процесом. Як критерій оптимізації враховано експлуатаційні витрати, що виникають у процесі формування та прямування маршрутного поїзда в напрямку західних кордонів. Розроблена модель ураховує ймовірнісний характер часу формування состава маршрутного поїзда на станції навантаження, що підлягає нормальному

закону розподілу. Для забезпечення практичної реалізації моделі враховано технологічні та нормативні умови, відображені в системі обмежень. Використання запропонованої технології дасть змогу значно покращити виробничі показники АТ «Укрзалізниця», тобто забезпечить виключення обробки вагонів у процесі перевезення, зменшення часу обігу вантажного вагона, оптимізацію процесу планування перевезення навалочних вантажів, а також збільшення прогнозованості часу перетину вагоном кордону. Таку модель доцільно інтегрувати до автоматизованих систем управління всіх учасників перевізного процесу.

Встановлено величину затримки, що впливає на своєчасність прибуття маршрутного поїзда до західного кордону для передання навалочного вантажу іноземному перевізнику. На величину затримки впливає ряд незалежних параметрів, тому для її визначення застосовано методи нечіткої логіки. Урахування даних про затримки, викликаних виникненням збоїв при транспортуванні, дасть змогу обмежити їхній вплив на перевізний процес за рахунок раннього попередження, а при плануванні – можливість закладати резерви часу на маршруті вантажних поїздів, що рухаються за фіксованим розкладом.

### Список використаних джерел

1. Експорт лише чотирьох ключових аграрних товарів з України щорічно становить близько 60 млн тонн. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1526701>.
2. Wang E., Yang L., Li P., Zhang C., Gao Z. Joint optimization of train scheduling and routing in a coupled multi-resolution space-time railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 147, 103994. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103994>.
3. Murali P., Ordóñez F., Dessouky M. Modeling strategies for effectively routing freight trains through complex networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 70. P. 197-213. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.022>.
4. Lin B., Zhao Y., Lin R., Liu C. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 93, 2021. P. 811-830. DOI:10.1016/j.apm.2020.12.031
5. Ломотько Д. В., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Логістичні підходи щодо оптимізації складу маршрутних поїздів в системі «вантажовласник – залізниця». *Залізничний транспорт України*. 2020. № 4. С. 4-14. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13270>.
6. Бауліна Г. С., Богомазова Г. Є, Мішков В. С. Розробка моделі формування ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами на залізницях України. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 187. С. 42-52. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/1799>.
7. Бутько Т. В., Харланова С. В., Шахраюк В. А. Підходи до удосконалення контейнерних інтермодальних перевезень в умовах впровадження приватної локомотивної тяги. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 16-23. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229018>.
8. Butko T., Kostienikov O., Parkhomenko L., Prohorov V., Bogomazova G. Formation of an automated technology of cargo transportation control on the direction. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 1, № 3 (97). P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156098>.
9. Pineda-Jaramillo J., Viti F. Identifying the rail operating features associated to intermodal freight rail operation delays. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 147, 103993. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103993>.

10. Wagener N., Aritua B., Zhu T., 2020. The New Silk Road: Opportunities for Global Supply Chains and Challenges for Further Development. *LogForum. Scientific Journal of Logistics*. 2020. Vol. 16 (2). P. 193-207. URL: <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2020.403>.
11. Krauth M., Haalboom D. An Economic View on Rerouting Railway Wagons in a Single Wagonload Network to Avoid Congestion. *European Transport Research Review. An Open Access Journal*. 2022. Iss. 14:48. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00573-y>.
12. Karam A., Reinau K. H., Østergaard C. R. Horizontal Collaboration in the Freight Transport Sector: Barrier and Decision-Making Frameworks. *European Transport Research Review. An Open Access Journal*. 2021. Iss. 13(1):53. 22 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00512-3>.
13. Svetashev A., Kamaletdinov S., Svetasheva N., Mustaeva G. Formation of the Freight Trains With a Fixed Train Schedule. *E3S Web of Conferences. CONMECHYDRO – 2021*. 2021. Iss. 264, 05040. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405040>.
14. Xiao J., Lin B., Wang J. Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 86. P. 124–146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006>.
15. Бауліна Г. С., Дідух П. О., Карпаш А. М., Федорняк І. І. Удосконалення технології функціонування перевантажувального комплексу прикордонної перевантажувальної станції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 162. С. 182-189. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78448>.
16. Prokhorchenko A., Kravchenko M. & Gurin, D. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. 36, С. 184-198. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-19>.
17. Baulina H., Bohomazova H., Prodashchuk S. Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*, 2023. 14 (39), P. 400-414. URL: <http://dx.doi.org/10.46925/rdluz.39.22>.
18. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с.

---

Ковальов Антон Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>. E-mail: [kovalov.uvkr@kart.edu.ua](mailto:kovalov.uvkr@kart.edu.ua).

Бауліна Ганна Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8464-1507>. E-mail: [baulina.uvkr@kart.edu.ua](mailto:baulina.uvkr@kart.edu.ua).

Богомазова Ганна Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8042-0624>. E-mail: [bogomazova.uvkr@kart.edu.ua](mailto:bogomazova.uvkr@kart.edu.ua).

Керницький Іван Вікторович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

Мигалатій Євген Анатолійович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

Kovalov Anton, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>.

E-mail: [kovalov.uvkr@kart.edu.ua](mailto:kovalov.uvkr@kart.edu.ua).

Baulina Hanna, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-001-8464-1507>.

E-mail: [baulina777@gmail.com](mailto:baulina777@gmail.com).

---

Bohomazova Hanna, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8042-0624>.

E-mail: bogomazova.uvkr@kart.edu.ua.

Kernytskyi Ivan, postgraduate of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

Myhalatii Yevhen, postgraduate of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 28.11.2023 р.