

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-2-72.40>

Киман А. М., кандидат технічних наук,
докторант Українського державного університету залізничного
транспорту
ORCID: 0000-0002-4000-3287

Прохорченко А. В., доктор технічних наук,
професор Українського державного університету залізничного
транспорту
ORCID: 0000-0003-3123-5024

Ляпін Д. Ю., аспірант Українського державного університету
залізничного транспорту
ORCID: 0009-0001-6528-7212

Титаренко О. Є., аспірант Українського державного університету
залізничного транспорту
ORCID: 0009-0005-3321-1108

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАГОВИХ ЕФЕКТІВ У ФОРМУВАННІ ЗАТРИМОК ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ

У статті представлено результати дослідження часових лагових залежностей між обсягами прийняття вагонів до перевезення та поїздо-годинами затримок вантажних поїздів на залізничній мережі України. Метою роботи є виявлення та кількісне оцінювання часової інерції формування затримок у перевізному процесі залізниці для обґрунтування можливості прогнозування розвитку перевантаження та своєчасного виявлення вузьких місць мережі. Дослідження виконано на основі операційних даних АТ «Укрзалізниця» щодо обсягів навантаження вагонів і тривалості простою кинутих поїздів на мережі. Для аналізу часових взаємозв'язків використано крос-кореляційний аналіз із застосуванням коефіцієнта лінійної кореляції Пірсона та коефіцієнта рангової кореляції Спірмена. Це дозволило оцінити як лінійні, так і монотонні залежності між показниками. Розрахунки виконано для лагів у діапазоні до 34 днів, що забезпечило виявлення як короткострокових, так і середньострокових інерційних ефектів функціонування залізничної системи. У результаті проведеного аналізу встановлено наявність статистично значущого відкладеного у часі зв'язку між зміною обсягів прийняття вагонів до перевезення та поїздо-годинами затримок. Показано, що сила кореляційного зв'язку поступово зростає зі збільшенням лага та досягає максимальних значень у середньостроковому інтервалі 15–23 дні, де коефіцієнт кореляції Пірсона становить до 0,66. Отримані результати свідчать про наявність вираженої часової інерції функціонування перевізного процесу, коли наслідки зростання обсягів перевезень проявляються із суттєвим часовим запізненням. Додатково встановлено просторову неоднорідність лагових ефектів на рівні окремих станцій, де пікові лаги змінюються від 1 до 29 днів залежно від ролі станцій у мережі та її технологічних можливостей.

Отримані результати демонструють потенціал використання лагового аналізу для виявлення критичних періодів формування перевантаження мережі та обґрунтування прийняття рішення про введення конвенцій на відправлення вантажів. Запропоноване правило для визначення оптимального часового інтервалу для введення конвенційних обмежень на приймання вантажів. Практичне значення дослідження полягає у формуванні аналітичної основи для розроблення систем підтримки прийняття рішень для формування випереджувальних управлінських рішень щодо завчасного виявлення критичних місць у мережі.

Ключові слова: залізнична мережа, вантажні перевезення, затримки, крос-кореляція, перевантажена інфраструктури, пропускна спроможність, розвиток мережі.



© А. М. Киман, А. В. Прохорченко, Д. Ю. Ляпін, О. Є. Титаренко, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Kyman A. M., Prokhorchenko A. V., Liapin D. Yu., Tytarenko O. Ye. Research on the effects of delays in the formation of freight trains on the railway network of Ukraine

The article presents the results of a study of time-lag relationships between the volumes of wagons accepted for transportation and train-hours of delays of freight trains on the railway network of Ukraine. The aim of the study is to identify and quantitatively assess the temporal inertia of delay formation in the railway transportation process in order to substantiate the possibility of forecasting the development of network congestion and timely identification of bottlenecks in the railway network. The research is based on operational data of JSC Ukrzaliznytsia on wagon loading volumes and the duration of idle time of abandoned trains on the network. To analyse temporal relationships, cross-correlation analysis was applied using the Pearson linear correlation coefficient and the Spearman rank correlation coefficient. This made it possible to evaluate both linear and monotonic relationships between the studied indicators. Calculations were performed for lags in the range of up to 34 days, which allowed the identification of both short-term and medium-term inertial effects in the functioning of the railway system. The results of the analysis revealed a statistically significant time-delayed relationship between changes in the volumes of wagons accepted for transportation and train-hours of delays. It was shown that the strength of the correlation gradually increases with the growth of the lag and reaches its maximum values in the medium-term interval of 15-23 days, where the Pearson correlation coefficient reaches up to 0.66. The obtained results indicate the presence of pronounced temporal inertia in the functioning of the railway transportation process, when the consequences of increased traffic volumes manifest themselves with a significant time delay. In addition, spatial heterogeneity of lag effects was identified at the level of individual railway stations, where peak lags vary from 1 to 29 days depending on the role of a station in the network and its technological capacity.

The obtained results demonstrate the potential of lag analysis for identifying critical periods of network congestion formation and for substantiating decisions on the introduction of temporary restrictions (conventions) on freight dispatching. A rule is proposed for determining the optimal time interval for introducing such conventional restrictions on the acceptance of freight for transportation. The practical significance of the study lies in forming an analytical basis for the development of decision-support systems aimed at enabling proactive management decisions for the early identification of critical bottlenecks within the railway network.

Key words: railway network, freight transportation, delays, cross-correlation, overloaded infrastructure, capacity, network development.

Постановка проблеми. Залізнична система України майже кожен рік в період пікового навантаження стикається із значними заторами в напрямі морських портів [1, 2]. До початку широкомасштабного російського вторгнення в Україну проблема виникнення затримок вантажних поїздів набула системного характеру та призводила до виникнення значних збитків для всіх учасників ринку перевезень. Умови воєнного стану, структурна перебудова логістики, переорієнтація експортних потоків до західних залізничних переходів та повернення до морських портів в умовах обмеження пропускної спроможності інфраструктури посилюють значущість проблеми затримок вантажних поїздів [3]. Затори на підходах до портів і прикордонних переходів призводять до зростання поїздо-годин простою, зниження обороту вагонів, втрат перевізної спроможності та збитків для залізниці та вантажовідправників.

В практиці управління перевізним процесом одним із основних інструментів реагування на перевантаження інфраструктури є запровадження конвенційних обмежень навантаження на окремі станції, напрями або вантажовідправників [4]. Однак, рішення щодо введення таких обмежень переважно приймаються експертно, без кількісного урахування часових закономірностей розвитку перевантаження. У результаті управлінські заходи можуть впроваджуватися або передчасно, що призводить до недовикористання пропускної спроможності та втрати доходів, або із запізненням, коли затор вже сформувався і має лавиноподібний характер. Це свідчить про наявність складних динамічних процесів у залізничній системі, де зміни в обсягах прийняття вагонів до перевезення не призводять до миттєвих змін показників експлуатаційної роботи. Дослідження лагових ефектів в процесі формування затримок є важливими для створення динамічних моделей функціонування залізничної мережі для розроблення предективних механізмів регулювання перевезень. З практичної точки зору виявлення часової інерції дозволяє визначати критичні порогові значення навантаження, оцінювати швидкість поширення перевантаження між вузлами та прогнозувати виникнення “вузьких місць” до моменту їх фактичного формування. Це забезпечує перехід від реактивного до проактивного формування середньо- та довгострокових стратегій розвитку інфраструктури.

Отже, дослідження лагових ефектів у формуванні затримок вантажних поїздів відповідає актуальним потребам розвитку залізничної галузі України, спрямоване на підвищення стійкості та адаптивності перевізного процесу та формує наукову основу для вдосконалення механізмів управління експлуатаційною роботою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика дослідження причин виникнення та поширення затримок поїздів у залізничних мережах розглядається у вітчизняних і зарубіжних дослідженнях у кількох взаємопов'язаних напрямках, зокрема у напрямі удосконалення плану формування поїздів, оцінювання пропускної та переробної спроможності станцій, аналіз взаємодії залізниці з портами, статистичне моделювання затримок та дослідження каскадного поширення збурень у мережах.

У роботі [5] уточнено модель розрахунку плану формування поїздів із урахуванням навантаженості сортувальних станцій. Автори обґрунтовують необхідність врахування реальної переробної спроможності

вузлів при оптимізації структури потоків. Разом з тим затримки поїздів розглядаються як наслідок перевантаження, але не аналізується часовий механізм їх формування. Подібна спрямованість характерна і для роботи [6], у якій запропоновано статистичний підхід до оцінювання переробної спроможності станцій. Автори формують кількісну базу для визначення граничних параметрів роботи вузлів, що є важливим для виявлення потенційних «вузьких місць». Однак, дослідження зорієнтоване на виявлення граничних рівнів використання інфраструктури і не аналізує відкладену реакцію системи на зміну обсягів навантаження. У статті [7] проведено аналіз основних чинників, що впливають на виконання графіка руху вантажних поїздів, включаючи технологічні операції на станціях, резерви часу в розкладі, несправності рухомого складу та операційні відхилення. Використовуючи методи математичної статистики, встановлено залежності між режимом роботи приймально-відправних парків і ймовірністю затримок, а також запропоновано рекомендації щодо оптимізації часових резервів для підвищення пунктуальності руху. При цьому дослідження не охоплює часові лагові ефекти між змінами навантаження і формуванням затримок як системного процесу, що відкриває наукову нішу для подальших досліджень у цьому напрямі.

Проблематика виникнення затримок на мережі особливо загострюється на стику залізничного та портового транспорту, де концентруються експортно-орієнтовані вантажопотоки. Саме на цьому рівні формуються критичні перевантаження, що згодом трансформуються у системні затримки поїздів на підходах до морських терміналів. У цьому контексті в роботі [8] обґрунтовується, що саме дисбаланс між провізною спроможністю залізничних підходів і переробною спроможністю портових терміналів є однією з ключових причин накопичення вагонів та виникнення заторів на припортових станціях.

У сучасних зарубіжних дослідженнях проблематика затримок поїздів розглядається переважно у трьох напрямках. У роботі [9] та співавторів увагу зосереджено на каскадному поширенні затримок і стійкості мережі, однак не аналізується вплив змін навантаження на їх первинне формування. У дослідженнях [10] та [11] зосереджено увагу на статистичному та ймовірнісному прогнозуванні затримок і взаємозв'язках між вузлами, проте відсутній аналіз часової інерції накопичення поїздо-годин простою. Робота [12] присвячена управлінню вже виниклими затримками, а огляд [13] систематизує алгоритмічні підходи до їх передбачення, але без дослідження механізму відкладеного розвитку перевантаження. У статті [14] запропоновано багаторівневу модель прогнозування затримок із урахуванням просторово-часових кореляцій, що дозволяє підвищити точність передбачення розвитку перевантаження у мережі. Водночас дослідження орієнтоване на вдосконалення алгоритмічних моделей прогнозу і не спрямоване на визначення характерних часових лагів між змінами обсягів навантаження та системним накопиченням затримок. Таким чином, у науковій літературі ідентифікуються фактори та моделюється поширення затримок, однак не визначаються часові лаги між зростанням обсягів навантаження і системним накопиченням затримок, що формує наукову нішу для подальших досліджень.

Метою статті є виявлення та кількісне оцінювання часової інерції формування затримок вантажних поїздів на залізничній мережі України на основі лагового аналізу залежностей між обсягами прийняття вагонів до перевезення та поїздо-годинами затримок для створення наукової основи прогнозування розвитку перевантаження та своєчасного виявлення вузьких місць мережі.

Виклад основного матеріалу. Гіпотеза дослідження полягає в тому, що зростання обсягів прийняття вагонів до перевезення на залізничній мережі призводить до збільшення поїздо-годин затримок не миттєво, а з певною часовою затримкою, зумовленою інерційністю функціонування перевізного процесу. Внаслідок цього між змінами обсягів навантаження та накопиченням затримок існує відкладений у часі статистичний зв'язок, який може бути кількісно оцінений за допомогою лагового кореляційного аналізу.

Для перевірки висунутої гіпотези використано операційні дані АТ «Укрзалізниця» щодо навантаження зернових вантажів, будівельних матеріалів та інших вантажів, за винятком вантажів гірничо-металургійного комплексу, за період з 1 вересня 2019 року по січень 2020 року. База навантаження містить 110 567 записів із зазначенням дати та часу виконання операцій, станцій відправлення та призначення вагонів, а також кодів вантажів. Додатково використано дані про затримки поїздів на полігоні мережі регіональної філії «Одеська залізниця», що містять 7 682 записи з інформацією про дату, час, кількість і тривалість простою кинутих поїздів на станціях (довідка форми «Детальна довідка про затримку поїздів по станціям дирекцій Одеська залізниця більше 12 годин за період звітних дат»).

На основі первинних даних сформовано добові часові ряди сумарних обсягів навантаження на мережі та сумарної тривалості затримок вантажних поїздів. Крім того, дані обсягів навантаження та поїздо-годин затримок розподілені за 142 станціями згідно Плану Формування Поїздів (ПФП). Дані обсягів навантаження на мережі також було агреговано за трьома родами вантажу («агропродукція», «будматеріали» та «інші») та видом вагонопотоку (маршрутна та вагонна відправка). Динаміка відповідних показників наведена на рис. 1. Рисунок 1, *a* відображає зміну загального навантаження на мережі, рис. 1, *b* – структуру навантаження за видами відправок, а рис. 1, *c* – сумарні поїздо-години затримок. Візуальний аналіз графіків свідчить про наявність подібних тенденцій у зміні навантаження та затримок, однак їх піки у часі не збігаються, що свідчить про можливу наявність часової інерції у формуванні затримок.

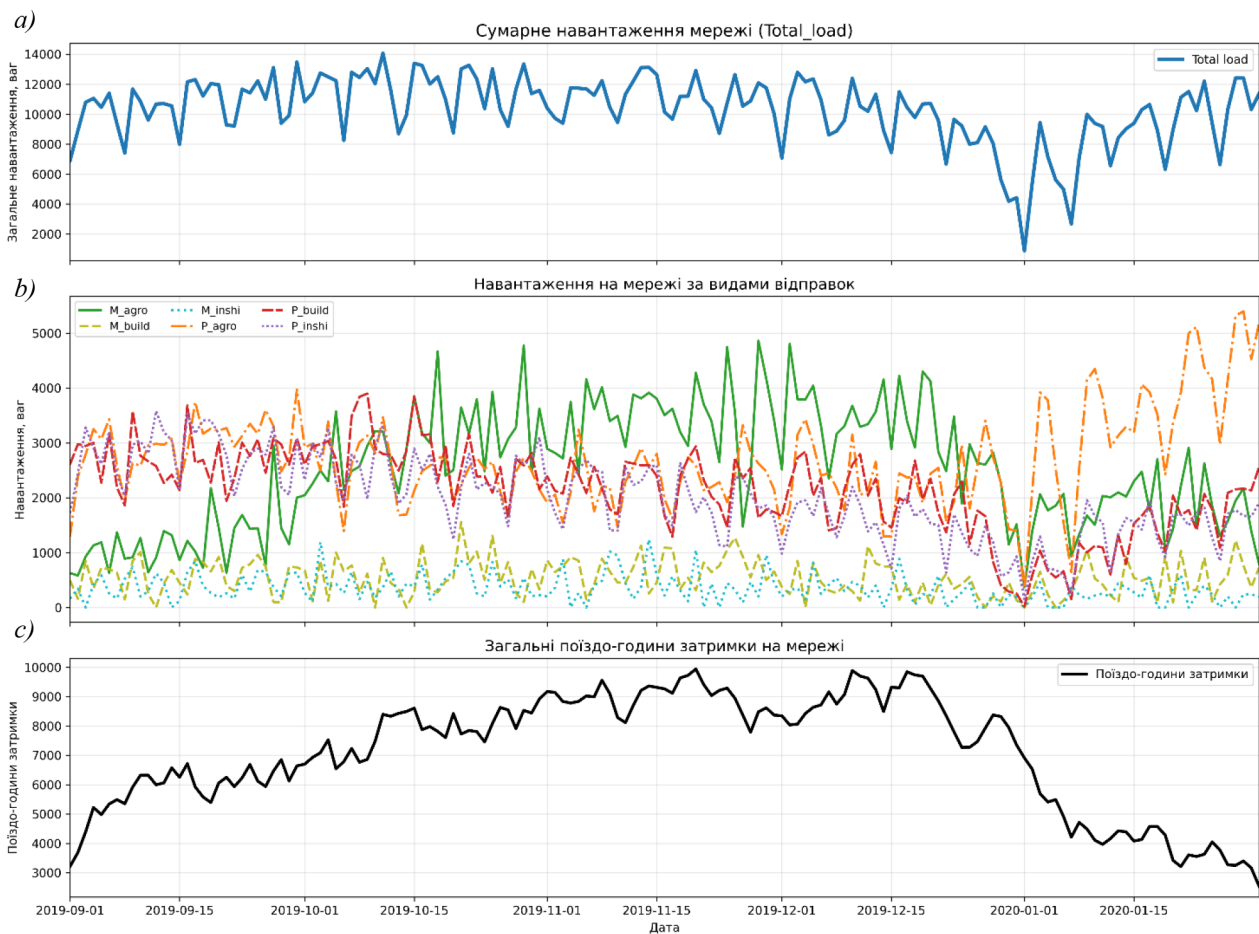


Рис. 1. Динаміка навантаження та затримок вантажних поїздів на мережі АТ УЗ у період вересень 2019 – січень 2020 р

Примітка: а – сумарний обсяг навантаження; б – навантаження за видами відправок; с – сумарні поїздо-години затримок

Для дослідження взаємозв'язку між навантаженням та затримками використано лагову кореляційну функцію (англ., time-lagged cross-correlation) [15], що визначається як кореляція між рядом x_t та зсунутим рядом $y_{t+\tau}$

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\text{cov}(x_t, y_{t+\tau})}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

де $\rho_{xy}(\tau)$ – функція лагової крос-кореляції, що характеризує ступінь статистичного зв'язку між значенням x_t та значенням y_t , що зміщене у часі на τ ; τ – часовий лаг, доба; x_t – добовий обсяг навантаження у добу t , вагонів; y_t – добові поїздо-години затримок, поїздо-год ($t = 1, 2, \dots, T$), де T – довжина вибірки; Для кожного лага $\tau \in [0, \tau_{\max}]$ досліджувалася залежність між x_t та $y_{t+\tau}$. Прийнято $\tau_{\max} = 35$; $\text{cov}(\cdot)$ – коваріація між значеннями часового ряду обсягу навантаження у момент часу t та значеннями часового ряду поїздо-годин затримок, зміщеними на лаг τ ; $\sigma_x \sigma_y$ – відповідно середньоквадратичне відхилення значень часового ряду навантаження та поїздо-годин затримок.

Запропоновано функцію $\rho_{xy}(\tau)$ оцінити за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона (r) та коефіцієнта рангової кореляції Спірмена (r_s) [16].

Для кожного значення лага τ обчислювався коефіцієнт кореляції Пірсона

$$r(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{T-\tau} (x_t - \bar{x})(y_{t+\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-\tau} (x_t - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T-\tau} (y_{t+\tau} - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

де \bar{x}, \bar{y} – середні значення відповідних рядів.

Для перевірки наявності монотонної залежності додатково визначався коефіцієнт Спірмена

$$r_s(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{T-\tau} (R_{x_t} - R_{\bar{x}})(R_{y_{t+\tau}} - R_{\bar{y}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-\tau} (R_{x_t} - R_{\bar{x}})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T-\tau} (R_{y_{t+\tau}} - R_{\bar{y}})^2}}, \quad (3)$$

де R_x, R_y – ранги відповідних значень.

Для кожного значення лага в інтервалі до 35 днів оцінювалися коефіцієнти кореляції Пірсона (r) та Спірмена (r_s) між поточними значеннями навантаження та відкладеними у часі значеннями показника затримок. Отримана лагова залежність наведена на рисунку 2.

Отримані результати лагової кореляції свідчать про наявність вираженого та статистично значущого часово відкладеного зв'язку між загальним обсягом перевезень та поїздо-годинами затримки поїздів. Уже при нульовому лагу зафіксовано позитивну кореляцію середньої сили з коефіцієнтом Пірсона $r = 0,226$ та коефіцієнтом Спірмена $r_s = 0,211$ при рівнях значущості $p < 0,01$, що вказує на безпосередній вплив навантаження мережі на затримки у той самий часовий період. Із зростанням лага до 3–5 днів кореляція поступово посилюється, досягаючи значень $r = 0,350$ – $0,433$ та $r_s = 0,297$ – $0,362$, що свідчить про кумулятивний характер впливу обсягів навантаження на затримки.

Найбільш інтенсивне зростання кореляційних зв'язків спостерігається у коротко- та середньостроковому інтервалі від 7 до 11 діб, де коефіцієнт Пірсона зростає з $r = 0,463$ при лагу 7 діб до $r = 0,580$ при лагу 11 діб, тоді як коефіцієнт Спірмена відповідно збільшується з $r_s = 0,398$ до $r_s = 0,502$. Усі отримані оцінки є статистично значущими на рівні $p < 0,001$, що підтверджує стійкість виявленої залежності. Максимальні значення лагової кореляції досягаються у середньостроковому діапазоні від 15 до 23 днів. Зокрема, при лагу 15 днів коефіцієнт Пірсона становить $r = 0,614$, а при лагу 16–17 діб зберігається на рівні $r \approx 0,622$.

Найвище значення зафіксовано при лагу 23 дні, де $r = 0,659$, тоді як відповідний коефіцієнт Спірмена сягає $r_s = 0,532$. Це вказує на наявність ефекту затяжного перевантаження залізничної мережі, коли наслідки зростання обсягів перевезень реалізуються у вигляді підвищених затримок протягом двох-трьох тижнів після первинного зростання навантаження.

Після 25-го дня спостерігається поступове зниження сили кореляційного зв'язку, однак навіть при лагу 30 днів коефіцієнт Пірсона залишається на відносно високому рівні $r = 0,560$, а коефіцієнт Спірмена становить $r_s = 0,481$, що свідчить про тривалу інерційність процесів у залізничній системі. До 34-ого дня кореляція зменшується до $r = 0,419$ та $r_s = 0,409$ за Спірменом, проте зберігає статистичну значущість. Узгодженість числових значень коефіцієнтів Пірсона та Спірмена на всьому дослідженому інтервалі лагів підтверджує робастність виявлених закономірностей і свідчить про поєднання лінійних та монотонних компонент взаємозв'язку між навантаженням і затримками.

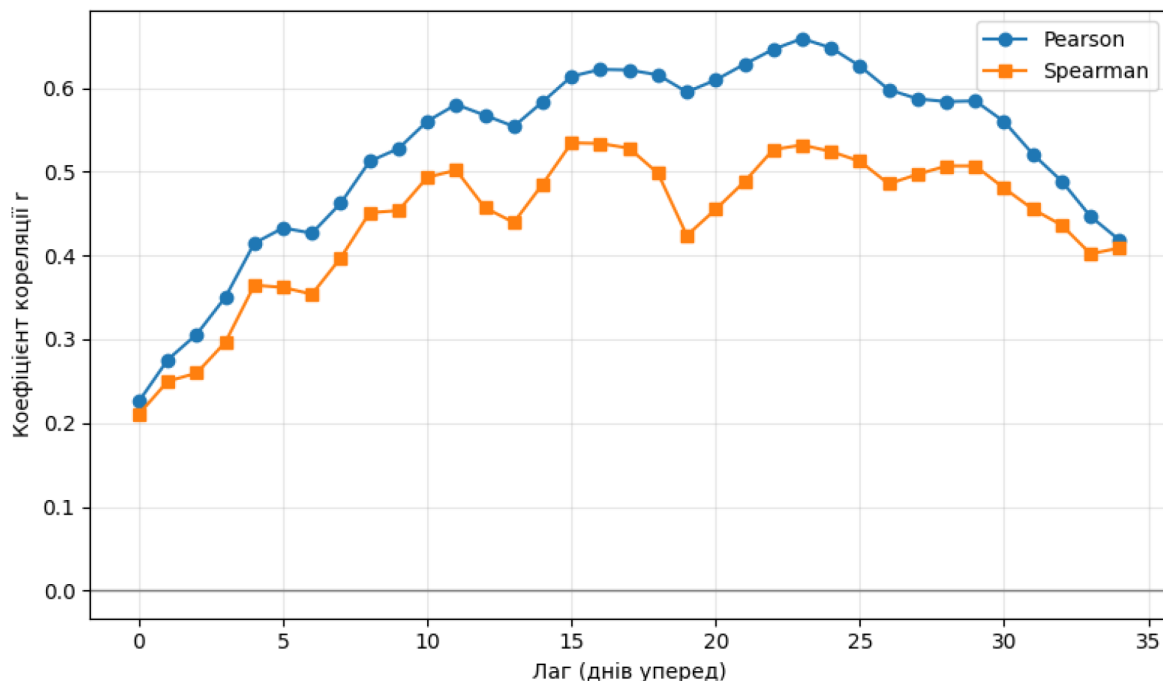


Рис. 2. Лагова залежність між загальним навантаженням та затримками поїздів

Для деталізації взаємозалежності в роботі виконано помісячний лаговий аналіз зв'язку між загальним агрегованим навантаженням і загальними поїздо-годинами затримки поїздів (див. рис. 3). Згідно до наведених результатів кореляції в усіх місяцях мають невелику або помірну величину. У всіх проаналізованих місяцях найстабільніший і найбільший за модулем зв'язок спостерігається саме на лагах до 5–7 днів. В межах першого тижня значення кореляції хоча і швидко зменшуються, але переважно зберігають один і той самий знак, і залишаються статистично значущими або близькими до значущих.

Загалом результати демонструють сезонну варіативність і зміну знаку кореляції на середніх лагах, що узгоджується з інерційністю процесу перевезення і можливим ефектом перерозподілу потоків, коли підвищені обсяги в певні періоди супроводжуються короткостроковим зростанням поїздо-годин затримки, але на горизонті 2–4 тижнів проявляється компенсаторний механізм через адаптацію планування та зміну структури перевезень.

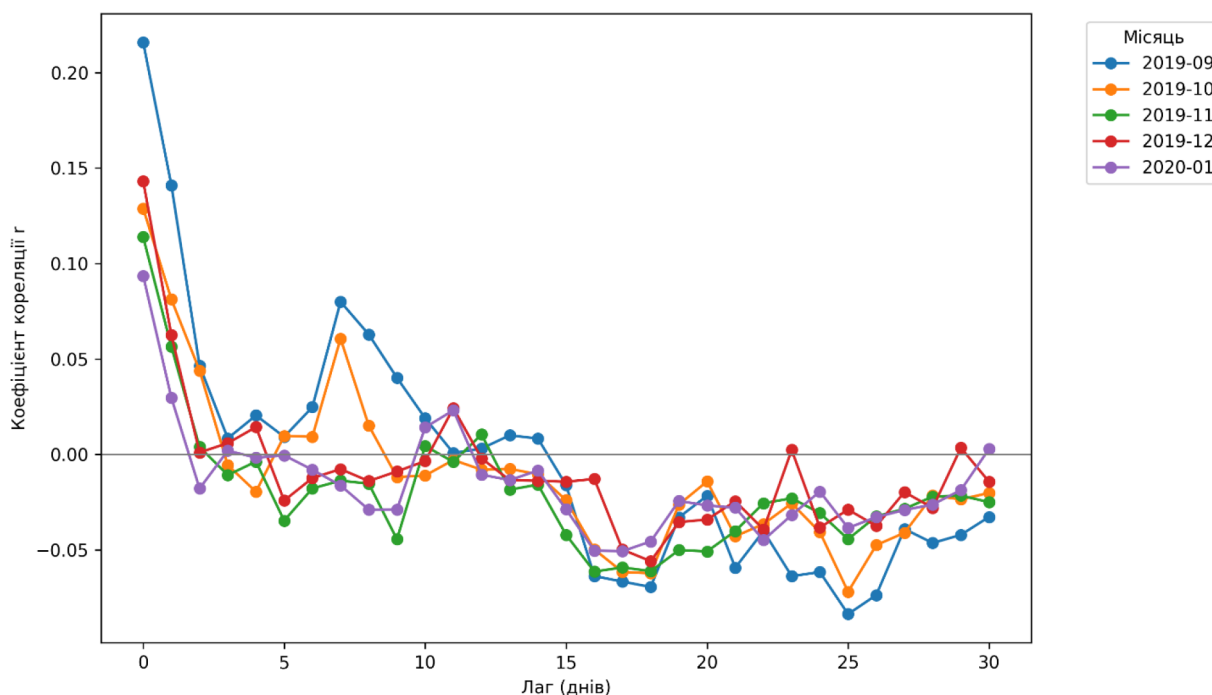


Рис. 3. Лагова залежність між загальним навантаженням за окремими місяцями та затримками поїздів

Для деталізації виявлення часового відкладеного впливу окремих родів вантажу і видів вагонопотоку на інтегральний показник поїздо-годин затримок виконано лагову кореляцію за факторами (див. рис. 4). У результаті лагового аналізу чітко виділяються кілька ключових закономірностей впливу факторів на показник поїздо-годин затримок поїздів. Найсильніший і практично миттєвий зв'язок спостерігається для маршрутних відправок аграрних вантажів (M_{agro}), де коефіцієнт кореляції вже при 0–1 днів становить $r \approx 0,70$ та $r_s \approx 0,74$ при високій статистичній значущості. Подальше зменшення кореляції зі збільшенням лага має поступовий характер, однак зв'язок залишається значущим майже до 30-го дня, що вказує на виражений інерційний ефект впливу навантаження аграрних вантажів на процес перевезення. Зв'язок для маршрутних відправок інших вантажів (M_{inshi}) має помірний, але стабільний позитивний із затримками, з максимумом $r \approx 0,35$ на лагах близько 10–12 днів, що відображає системний, але не домінуючий вплив цього роду вантажу. Для маршрутних відправок будівельних матеріалів (M_{build}) кореляція також є слабкою на малих лагах і стає статистично значущою лише починаючи приблизно з 6–7 днів, досягаючи помірних значень $r \approx 0,30$ – $0,34$ на середніх лагах.

Фактори, що відповідають вагонним відправкам будівельних (P_{build}) та інших (P_{inshi}) вантажів, демонструють відкладений у часі вплив. Для них кореляція зростає зі збільшенням лага і досягає максимальних значень у середньостроковому інтервалі 20–30 днів, де $r \approx 0,60$ – $0,63$. Це свідчить про накопичувальний характер формування затримок, пов'язаний із тривалим перевантаженням інфраструктури. Вагонні відправки з агровантажем відрізняється стійкою негативною кореляцією на коротких лагах, де $r \approx -0,58$ при нульовому лагу, з поступовим зникненням зв'язку після 15–20 днів. Це може свідчити про ефект заміщення, коли збільшення частки агровантажів у структурі перевезень супроводжується скороченням інших вантажів, що більше впливають на затримки. Отримані результати підтверджують доцільність використання коротких часових вікон для відображення короткострокового впливу обсягів вантажів в межах прийняття рішень. Слід зазначити, що включення лагових або агрегованих ознак для врахування виявлених середньострокових інерційних ефектів призведе до скорочення навчальної вибірки з причин її обмеженості.

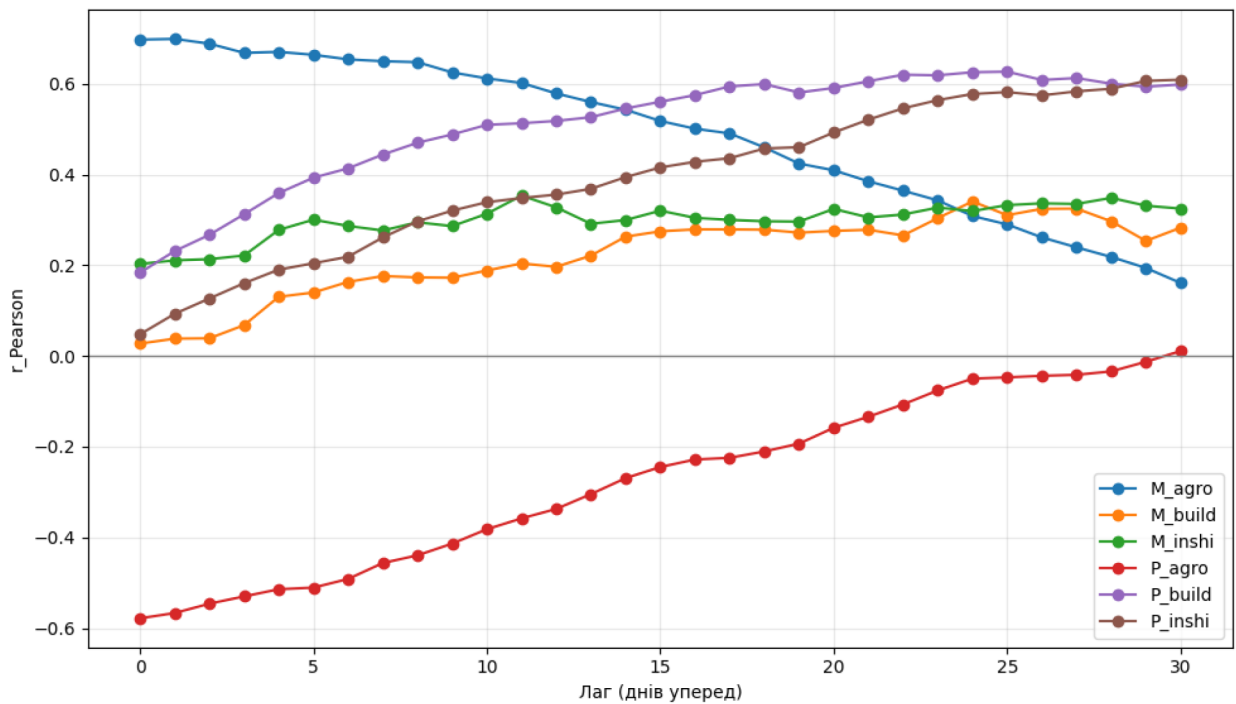


Рис. 4. Лагова залежність між навантаженням за окремими родами вантажу і видів вагонопотоку та затримками поїздів

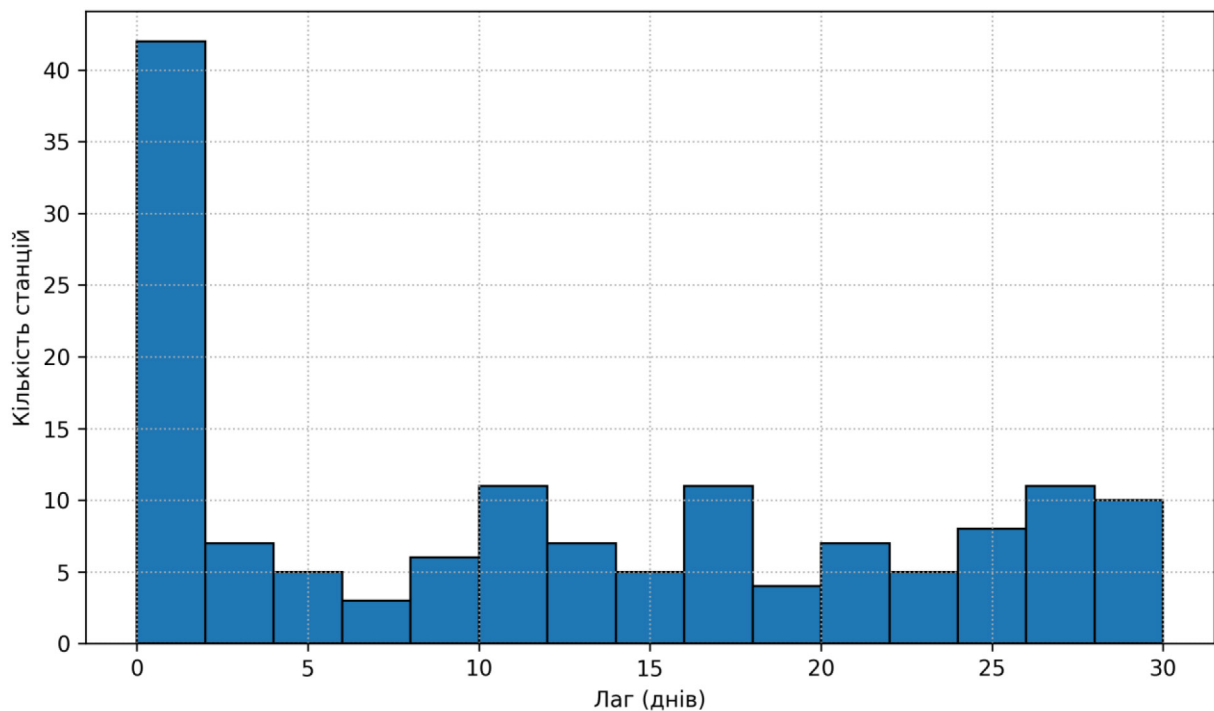


Рис. 5. Гістограма розподілу пікових лагів залежності між загальним навантаженням та затримками на станціях

Окрім часових ознак запропоновано виявити просторову неоднорідність часових лагів і визначити станції з найбільш вираженим відкладеним ефектом. Для цього виконано лагову кореляцію між добовим загальним навантаженням та затримками поїздів окремо для кожної станції ПФП. На рис. 5 наведено гістограму розподілу пікових лагів між станціями для узагальнення просторової неоднорідності.

Отримані результати свідчать про суттєву просторову неоднорідність лагових ефектів між загальним навантаженням та затримками поїздів на рівні окремих станцій. Середній піковий лаг по вибірці становить 11,78 днів, що узгоджується з наявністю інерційних процесів у залізничній мережі та підтверджує, що реакція затримок на зростання навантаження для окремих залізничних станцій проявляється не миттєво,

а з відкладенням приблизно на один-два тижні. Разом з тим розкид пікових лагів є значним і охоплює інтервал від 1 до 29 днів, що вказує на різні часові масштаби формування затримок. У таблиці 1 наведено зведену послідовність станцій з найвищими позитивними піковими значеннями кореляції. Для частини станцій, зокрема позакласної сортувальної станції Знам'янка, Чернігів з піковим лагом 4 дні та Гречани з лагом 1 день, характерний короткостроковий ефект, коли зміни навантаження швидко трансформуються у затримки. Такі станції є опорними для великих обсягів вагонопотоку, а їх технологія роботи та колійний розвиток не справляються з діючими обсягами і одразу генерують затримки.

Інша група станцій, серед яких Конотоп (16 днів), Бахмач-Пасажирський (13 днів) та Ворожба (13 днів), демонструє середньострокові лаги з помірно високими значеннями кореляції ($r \approx 0,22-0,27$). Такі станції як Нижньодніпровськ-Вузол (18 днів), Верховцеве (16 днів) та Куп'янськ-Сортувальний (12 днів) мають високі показники кореляції $r \approx 0,3-0,47$. Це свідчить про накопичувальний характер затримок, притаманний вузловим або транзитним станціям, де зростання навантаження спочатку поглинається внутрішніми резервами, а негативні наслідки проявляються з часовим запізненням.

Таблиця 1

Топ-10 станцій з найвищими позитивними піковими значеннями кореляції між загальним навантаженням і поїздо-годинами затримок

№	Код станції	Назва станції	Піковий лаг, днів	Коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона	Ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена
1	40390	Арциз	20	0,517	0,449
2	47630	Федорівка	22	0,563	0,152
3	41000	Знам'янка	4	0,468	0,443
4	45640	Верхівцеве	16	0,47	0,507
5	42830	Гребінка	29	0,423	0,272
6	45000	Нижньодніпровськ-Вузол	18	0,414	0,387
7	40000	Одеса-Сортувальна	24	0,372	0,396
8	41780	Херсон	28	0,376	0,336
9	46000	Запоріжжя-Ліве	20	0,36	0,357
10	43000	Куп'янськ-Сортувальний	12	0,342	0,329

Окрему увагу привертають станції для яких зафіксовано від'ємні значення пікової кореляції. Наприклад, Рені, Ізмаїл, Кривий-Ріг-Сортувальний мають кореляцію ($r \approx -0,3...-0,189$) та Київ-Волинський та Жмеринка, ($r \approx -0,15...-0,17$). Зведена таблиця топ-10 станцій наведена у табл. 2. Це може свідчити про наявність компенсаторних механізмів, зокрема перерозподілу потоків або зміни технології роботи, за яких зростання навантаження не призводить до збільшення затримок, а в окремі періоди навіть супроводжується їх зменшенням.

Таблиця 2

Топ-10 станцій з найбільшими від'ємними піковими значеннями кореляції між загальним навантаженням і поїздо-годинами затримок

№	Код станції	Назва станції	Піковий лаг, днів	Коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона	Ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена
1	40470	Рені	0	-0,306	-0,338
2	40450	Ізмаїл	11	-0,266	-0,335
3	41140	Кропивницький	26	-0,276	-0,296
4	42620	Ромни	21	-0,293	-0,257
5	46300	Пологи	24	-0,220	-0,261
6	44600	Тростянець-Смородине	23	-0,226	-0,247
7	40680	Подільськ	4	-0,229	-0,174
8	44410	Шебелинка	3	-0,238	-0,201
9	40320	Білгород-Дністровський	9	-0,245	-0,143
10	46710	Кривий Ріг-Сортувальний	7	-0,189	-0,178

Загалом результати підтверджують, що лагові залежності між навантаженням і затримками мають яскраво виражений локальний характер і суттєво залежать від класу та ролі станції в залізничній мережі. Це обґрунтовує доцільність врахування просторової неоднорідності за короткостроковими часовими лагами.

Спираючись на узагальнені результати вище проведеного лагового аналізу встановлено, що максимальний вплив зростання обсягів прийняття навантажених вагонів на накопичення поїздо-годин затримок у мережі проявляється через 15–23 дні, де коефіцієнт кореляції Пірсона досягає значень $r = 0,61–0,66$. Це означає, що перевантаження мережі формується із суттєвим часовим запізненням, що створює можливість для випереджувального управління вагонопотоками.

Виходячи з цього, запропоновано правило випереджувального регулювання навантаження:

$$t_{conv} = t_{load} + (L_{peak} - \Delta), \quad (5)$$

де t_{conv} – момент введення конвенції на відправлення вантажів, день;

t_{load} – момент фіксації значного зростання обсягів прийняття вагонів до перевезення, день;

L_{peak} – лаг, при якому досягається максимальна кореляція між навантаженням і затримками. За результатами дослідження $L_{peak} \approx 23$ дні;

Δ – випереджувальний інтервал управлінського реагування (рекомендовано 7–10 днів).

З урахуванням отриманих оцінок можна записати $t_{conv} = t_{load} + 13 \div 16$ днів. Для прикладу, якщо значне зростання обсягів навантаження зафіксовано 1 жовтня, то прогнозований максимум затримок виникне приблизно 1 жовтня + 23 дні = 24 жовтня. Відповідно оптимальний момент введення конвенції є 1 жовтня + 13–16 днів, тобто 14–17 жовтня. У такому випадку зменшення потоку вагонів відбудеться до моменту формування максимального затору.

Дотримання вище описаного правила для прийняття рішення про введення конвенцій на відправлення вантажів на основі отриманої лагової крос-кореляції дозволить знизити ймовірність розвитку пікового перевантаження мережі.

Висновки.

1. У результаті лагового кореляційного аналізу встановлено наявність статистично значущого часово відкладеного зв'язку між обсягами навантаження та поїздо-годинами затримок вантажних поїздів. Виявлено, що зі збільшенням лага кореляційний зв'язок поступово посилюється і досягає максимальних значень у середньостроковому інтервалі 15–23 днів, де коефіцієнт кореляції Пірсона становить до $r = 0,659$, а коефіцієнт Спірмена – $r_s = 0,532$, що свідчить про виражену часову інерційність процесів перевезення. Встановлено також суттєву просторову неоднорідність лагових ефектів. Пікові лаги між станціями змінюються в інтервалі від 1 до 29 днів, а середнє значення становить 11,78 днів. Це підтверджує, що формування затримок залежить від ролі станцій у мережі та їх технологічних можливостей. Для частини великих вузлових станцій, наприклад, позакласна сортувальна станція Знам'янка, характерні короткі лаги, що свідчить про швидке виникнення затримок при перевищенні пропускної та переробної спроможності, тоді як для транзитних вузлів затримки формуються поступово внаслідок накопичення перевантаження.

2. Отримані закономірності підтверджують можливість використання лагових залежностей як інформативної основи для прогнозування розвитку затримок у залізничній мережі. Встановлено, що короткострокові лаги до 5–7 днів є найбільш стабільними та статистично значущими для оперативного аналізу, тоді як середньострокові лаги до 2–3 тижнів відображають інерційні ефекти накопичення перевантаження залізничної інфраструктури. Також виявлено різний характер впливу окремих видів вагонопотоку. Для маршрутних відправок з агропродукцією спостерігається майже миттєвий вплив на затримки ($r \approx 0,70$), тоді як для вагонних відправок будівельних та інших вантажів максимальні значення кореляції досягаються на лагах 20–30 днів ($r \approx 0,60–0,63$). На основі лагового аналізу запропоновано правило випереджувального регулювання навантаження на залізничну мережу. Встановлено, що максимальний вплив зростання обсягів прийняття вагонів до перевезення на накопичення поїздо-годин затримок проявляється через 15–23 дні. З урахуванням цього конвенції щодо обмеження приймання вантажів доцільно вводити приблизно за 7–10 днів до очікуваного піку затримок, що відповідає інтервалу 13–16 днів після фіксації зростання навантаження. Такий підхід дозволяє реалізувати предективне управління перевізним процесом та запобігати розвитку мережевого перевантаження. Це дозволяє використовувати лагові ознаки як вхідні параметри моделей прогнозування, зокрема LSTM-моделей, для завчасного виявлення ризику перевантаження мережі та виявлення критичних місць у мережі.

Список використаних джерел:

1. Прохорченко А. В., Кравченко М. А., Гурін Д. О. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Зб. наук. праць ДУІТ. Сер. Транспортні системи і технології*. 2020. № 36. С. 184–198. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-19>
2. Кількість покинутих поїздів на мережі Укрзалізниці зроста майже вдвічі. Rail.insider. URL: <https://www.railinsider.com.ua/kilkist-pokynutyh-poyzdiv-na-merezhi-ukrzhaliznyczy-zrosla-majzhe-vdvichi/>
3. Черги з вагонів у бік західних прикордонних переходів продовжують зростати. Reil.insider. 2022. 19 трав. URL: <https://www.railinsider.com.ua/cherhy-z-vagoniv-u-bik-zahidnyh-prykordonnyh-perehodiv-prodovzhuyutzrostaty/>

-
4. Тимчасові обмеження щодо перевезень. Офіційний сайт АТ УЗ. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/electronic_transportation/conventions/
 5. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 193–205. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310712>
 6. Taran I., Tilemisova A., Kozachenko D., Verlan A., Grevtsov S. Assessment of processing capacity of railway stations based on statistical analysis methods. *Journal of Applied Engineering Science*. 2025. Vol. 23, No. 4. P. 752–761. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-60902>
 7. Баланов В. О. Аналіз факторів, які впливають на забезпечення руху вантажних поїздів за розкладом. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2015. Вип. 10. С. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2015/57057>
 8. Вернигора Р. В., Золотаревська О. О. Аналіз сучасних проблем ефективної взаємодії залізниць та морських портів України. *Зб. наук. праць ДНУЗТ: Серія «Транспортні системи і технології перевезень»*. 2021. Вип. 21. С. 49–59.
 9. Daniotti, S., Servedio, V.D.P., Kager, J. et al. Systemic risk approach to mitigate delay cascading in railway networks. *npj. Sustain. Mobil. Transp.* 1, 15 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1038/s44333-024-00012-6>
 10. Yuan J., Hansen I. A. Prediction of train delays using Bayesian networks. Proceedings of the 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2012). Anchorage, USA, 2012. P. 1808–1813. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338885>
 11. Barta J., Rizzoli A. E., Salani M., Gambardella L. M., Statistical modelling of delays in a rail freight transportation network. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin, Germany. 2012. P. 1–12. DOI: [10.1109/WSC.2012.6465188](https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465188)
 12. König E. A review on railway delay management. *Public Transport*. 2020. Vol. 12. P. 335–361. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00233-1>
 13. Spanninger T., Trivella A., Büchel B., Corman F. A review of train delay prediction approaches. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. Vol. 22. Article 100312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100312>
 14. Wu J., Xiao X., Du B., Shen J., Wu Z., Wang Y., Yu X., Yang S. A multiscale-based model for train delay prediction considering spatio-temporal correlations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2026. Vol. 182. Article 105417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105417>
 15. Derrick, T. R., Thomas, J. M. Time Series Analysis: The Cross-Correlation Function. In: Innovative Analyses of Human Movement. Human Kinetics, 2004, pp. 189–205.
 16. Sheskin D. J. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 1880 p.

References:

1. Prokhorchenko, A. V., Kravchenko, M. A., & Hurin, D. O. (2020). Doslidzhennia vplyvu tekhnolohii perevezen vantazhiv za rozkladom rukhu na makropokaznyky zaliznychnoi systemy Ukrainy. *Transport Systems and Technologies. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 36, 184–198. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-19>
2. Kilkist pokynutykh poizdiv na merezhi Ukrzaliznytsi zroslo maizhe vdvichi. (n.d.). Rail.insider. Retrieved from <https://www.railinsider.com.ua/kilkist-pokynutyh-poyizdiv-na-merezhi-ukrzaliznytsi-zroslo-majzhe-vdvichi/>
3. Cherhy z vahoniv u bik zakhidnykh prykordonnykh perekhodiv prodovzhuut zrostaty. (2022, May 19). Rail.insider. Retrieved from <https://www.railinsider.com.ua/cherhy-z-vagoniv-u-bik-zahidnyh-prykordonnyh-perekhodiv-prodovzhuut-zrostaty/>
4. Tymchasovi обмеження shchodo perevezen. (n.d.). Official website of JSC Ukrzaliznytsia. Retrieved from https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/electronic_transportation/conventions/
5. Parkhomenko, L. O., & Prokhorov, V. M. (2024). Utochnennia modeli rozrakhunku planu formuvannia poizdiv za rakhunok urakhuvannia efektu navantazhenosti sortuvalnykh stantsii. *Bulletin of Pryazovskiy State Technical University. Series: Technical Sciences*, 48, 193–205. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310712>
6. Taran, I., Tilemisova, A., Kozachenko, D., Verlan, A., & Grevtsov, S. (2025). Assessment of processing capacity of railway stations based on statistical analysis methods. *Journal of Applied Engineering Science*, 23(4), 752–761. <https://doi.org/10.5937/jaes0-60902>
7. Balanov, V. O. (2015). Analiz faktoriv, yaki vplyvaiut na zabezpechennia rukhu vantazhnykh poizdiv za rozkladom. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 10, 5–9. <https://doi.org/10.15802/tstt2015/57057>
8. Vernyhora, R. V., & Zolotarevska, O. O. (2021). Analiz suchasnykh problem efektyvnoi vzaiemodii zaliznyts ta morskyykh portiv Ukrainy. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 21, 49–59.
9. Daniotti, S., Servedio, V. D. P., Kager, J., et al. (2024). Systemic risk approach to mitigate delay cascading in railway networks. *npj Sustainable Mobility and Transport*, 1, 15. <https://doi.org/10.1038/s44333-024-00012-6>

-
10. Yuan, J., & Hansen, I. A. (2012). Prediction of train delays using Bayesian networks. In Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2012) (pp. 1808–1813). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338885>
 11. Barta, J., Rizzoli, A. E., Salani, M., & Gambardella, L. M. (2012). Statistical modelling of delays in a rail freight transportation network. In Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 1–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465188>
 12. König, E. (2020). A review on railway delay management. *Public Transport*, 12, 335–361. <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00233-1>
 13. Spanninger, T., Trivella, A., Büchel, B., & Corman, F. (2022). A review of train delay prediction approaches. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 22, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100312>
 14. Wu, J., Xiao, X., Du, B., Shen, J., Wu, Z., Wang, Y., Yu, X., & Yang, S. (2026). A multiscale-based model for train delay prediction considering spatio-temporal correlations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 182, 105417. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105417>
 15. Derrick, T. R., & Thomas, J. M. (2004). Time series analysis: The cross-correlation function. In *Innovative analyses of human movement* (pp. 189–205). Human Kinetics.
 16. Sheskin, D. J. (2020). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures* (5th ed.). CRC Press.

Дата першого надходження статті до видання: 07.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026