

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н.,  
ПРОХОРОВ В. М., к.т.н.,  
КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к.т.н.,  
КОФАНОВ О. В.

(Український державний університет залізничного транспорту)

## Формування моделі ризику в задачі забезпечення дотримання строку доставлення вантажів в умовах невизначеності з використанням теорії нечітких множин і теорії Демпстера-Шафера

*Забезпечення своєчасного доставлення вантажів є ключовим моментом у процесі перевезень, значну роль у цьому питанні відіграють залізничні технічні станції, оскільки вони керують процесом обробки вагонопотоків. Складність вирішення цієї проблеми обумовлена наявністю безлічі факторів невизначеності, які можуть впливати на процес прийняття рішень. Традиційні методи керування ускладнюють їх оцінювання та облік при прийнятті управлінських рішень. Стаття присвячена проблемі оцінювання ризиків недотримання строків доставлення вантажів залізничним транспортом і необхідності розроблення сучасних моделей для її вирішення.*

*У рамках дослідження було запропоновано методологію та модель для оцінювання ризику запізнення вагонів із використанням теорії нечітких чисел і Демпстера-Шафера, що дає змогу враховувати варіабельність і невизначеність у прогнозах. Проаналізовано фактори невизначеності, які можуть ускладнювати процеси обробки та формування поїздів, а також параметри вагонів, які необхідно враховувати для мінімізації ризиків і зниження фінансових втрат залізничних перевізників.*

*Стаття пропонує методику обчислення очікуваного ризику, що ґрунтується на інтеграції різних значень часу запізнення та пов'язаних із ними наслідків. Також розроблено модель для комбінування інформації про час запізнення з різних джерел, що сприяє підвищенню точності прогнозів та ефективності оперативного планування.*

*У висновках зазначено про важливість запропонованої моделі для автоматизації процесу керування технічними та сортувальними станціями, що дасть змогу мінімізувати затримки в доставленні вантажів і знизити обсяги виплат штрафів залізничними підприємствами.*

*Ключові слова: дотримання строку доставлення вантажів, прогнозний строк затримки вагона, теорія Демпстера-Шафера, автоматизація керування технічною станцією, невизначеність, функція цільності ризику.*

### Постановка проблеми

У сфері вантажних перевезень, особливо залізничній логістиці, своєчасне доставлення вантажів є важливим завданням. Затримки з прибуття вагонів можуть призводити до значних фінансових і репутаційних втрат для всіх учасників ланцюга постачання. Традиційні методи оцінювання та керування ризиками, пов'язаними з запізненням вагонів, часто не враховують усіх аспектів невизначеності та варіабельності реальних умов експлуатації, через що необхідно розробляти більш точні та адаптивні моделі для прогнозування та оцінювання ризиків.

Метою дослідження є створення сучасної методології і моделі оцінювання ризиків запізнення вагонів для врахування всіх аспектів невизначеності та нелінійних наслідків затримок. Особливу увагу доцільно приділити використанню сучасних методів і теорій у сферах статистики та м'яких обчислень;

розробленню підходів для інтеграції джерел інформації, що дасть змогу підвищити точність прогнозів. Важливим завданням є застосування сучасних технологій автоматизації процесів оперативного планування та керування, що сприятиме зниженню обсягів виплати штрафів залізничними підприємствами.

Це дослідження прагне створити методологічну основу для покращення керування технічними і сортувальними станціями, що у свою чергу підвищить ефективність логістичних операцій і знизить ризики, пов'язані з затримками. За сучасних умов жорсткої конкуренції на транспортному ринку застосування передових методів аналізу даних і автоматизації процесів – це єдиний раціональний шлях для розроблення більш надійних і точних інструментів для оцінювання та керування ризиками в залізничних перевезеннях.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стаття [1] досліджує проблеми та невизначеності, пов'язані з оптимізацією організації перевезень для Китайського залізничного експресу (CRE). Автори пропонують оригінальний метод робастної оптимізації для вирішення коливань попиту, часу поїздки та інших факторів, які можуть впливати на ефективність мережі CRE. Аналіз визнає притаманну невизначеність у факторах, таких як попит, час поїздки та операційні обмеження, які ускладнюють оптимізацію системи CRE. Robust optimization framework розроблений для врахування цих невизначеностей. Дослідження базовано на спрощеній моделі мережі CRE і не повністю враховує складність реальних операцій. Крім того, аналіз обмежений певним періодом часу і може бути неприйнятним для майбутніх сценаріїв з іншими умовами.

Стаття [2] досліджує підхід до інтеграції моделей мережі залізничних вантажних дворів та оптимізаційних моделей для вдосконалення процесів керування в реальному часі. Автори пропонують комплексну модель, що поєднує імітаційну модель функціонування двору з процедурою оптимізації розподілу вагонів і локомотивів.

Проте в статті бракує детальної інформації про практичну реалізацію підходу, зокрема не наведено результатів його застосування на реальних даних. Крім того, не проаналізовано чутливість моделі до вихідних даних, наприклад точності прогнозування надходження вантажів, готовності локомотивів тощо.

Стаття [3] пропонує загальний підхід до розроблення системи керування сортувальною станцією в режимі реального часу (RTMYS). Автори описують основні функціональні вимоги та архітектуру такої системи, яка включає модулі прогнозування, оптимізації та підтримки прийняття рішень. Проте у статті відсутні конкретні деталі про методи реалізації, а також не надано інформацію про можливі проблеми з впровадженням чи потенційні ризики, такі як необхідність інтеграції з сучасними системами, забезпечення надійності та безпеки даних, вплив на персонал. Також у статті не використано ризикові моделі або моделі для оперування з неповною або нечіткою інформацією та іншими факторами невизначеності, що виникають у процесі оперативного керування технологічним процесом станції. Крім того, стаття не містить жодних доказів чи кількісних оцінок потенційних переваг запропонованого підходу.

Науковий звіт [4] є першим результатом Робочого пакета 2 «Управління сортувальною станцією у режимі реального часу» проекту «Автоматизований консорціум залізничних вантажних перевезень» (ARCC). Основними цілями цієї робочої групи є дослідження та визначення ефективних бізнес-процесів, а також розуміння та оптимізація процесів прийняття рішень на сортувальних станціях і терміналах.

У документі надано огляд динаміки прийняття рішень та оперативних проблем на сортувальних станціях і терміналах. Зазначено про необхідність покращення координації між керуванням мережею/лінією та керуванням операціями на місці для підвищення ефективності та реактивності. Звіт свідчить, що підвищення автоматизації та оптимізація процесу прийняття рішень можуть призвести до переваг, таких як скорочення затримок, краще використання активів і поліпшення прогнозування.

Однак у звіті не надано детальну інформацію про конкретні вимоги до автоматизації чи технічні можливості, необхідні для впровадження запропонованих рішень з оптимізації. Також відсутні кількісні докази або тематичні дослідження, які б підтверджували потенційні переваги. Крім того, у звіті не розглянуто можливі ризики чи бар'єри для впровадження, такі як інтеграція з застарілими системами, проблеми безпеки та надійності, вплив на робочу силу.

Загалом звіт є документом високого рівня, у якому визначено дослідницькі цілі та проблеми, пов'язані з керуванням сортувальною станцією в режимі реального часу.

Наступне дослідження [5] пропонує підхід до оптимізації сортування вагонів для системи керування сортувальними станціями в режимі реального часу для підвищення ефективності та регулярності сортувальних операцій з зосередженням на оптимізації класифікації вагонів. Розроблено математичну модель оптимізації та алгоритм на базі змішаного цілочисельного лінійного програмування для вирішення проблеми. Підхід показав значне покращення продуктивності на реальних даних сортувальної станції в Чехії. Він інтегрований у систему керування станціями для надання оптимальних рішень.

Однак це дослідження не містить деталей про практичну реалізацію та впровадження запропонованого підходу на реальних сортувальних станціях. Також недостатньо даних про вплив рішень на показники ефективності та надійності операцій сортування. Бракує оцінювання масштабованості та застосовності методу за різних умов.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі залізничного транспорту і логістики показує, що проблема пріоритетизації обробки вагонів на технічних станціях досі залишається недостатньо вивченою. У більшості публікацій цю проблему рідко розглядали як самостійне та чітко визначене завдання, тоді як основну увагу приділяли загальним питанням оптимізації залізничних перевезень та керування логістичними потоками. Найменше в літературі приділено увагу специфіці обробки вагонів на технічних станціях із застосуванням ризикових моделей.

У статті [6] була запропонована модель визначення пріоритету обробки вагонів при переформуванні поїздів на технічних станціях. Як основу такої моделі брали нейронну мережу, яка на основі декількох параметрів давала числову оцінку пріоритету обробки кожного вантажного вагона на станції, що надійшов у підсистему розформування/формування. До того ж така модель призначена для динамічного застосування, що означає, що пріоритет кожного вагона перевизначений динамічно багато разів у ході використання такої моделі в процесі виконання процедури оптимізації цільової функції моделі керування технологічним процесом станції. Тобто залежно від варіанта плану змінюється порядок обробки вагонів, а отже, змінюються і моменти початку обробки цих вагонів і відповідно до цього деякі параметри для визначення пріоритету обробки, такі як залишковий час доїзду вагона. Отже, така модель є відносно простою, її легко застосовувати в ході виконання оптимізаційних процедур, навіть для керування в реальному часі, адже вона практично не потребує обчислювальних ресурсів. Однак за всіх переваг такої моделі вона має значний недолік – вона фактично є чорним ящиком і не дає змогу проаналізувати проміжні етапи обчислень а також вплинути на них або проаналізувати. Цей недолік є концептуально важливим, адже кінцеве призначення таких моделей – це системи підтримки прийняття рішень (СППР), а вони передбачають надання особі, яка приймає рішення, не лише детальної інформації для аналізу, але й декількох варіантів рішень. Але якщо ми маємо таку важливу складову оптимізаційної процедури у вигляді чорного ящика, то надати цю інформацію і навіть забезпечити диверсифікацію проєктів рішень зробити практично неможливо. Така модель побудована за допомогою навчання на історичних даних і напевне формує у своїх внутрішніх структурах залежності, подібні до ризикових моделей, але цю інформацію неможливо надати користувачеві СППР, адже її неможливо отримати з моделі, вона там зберігається у вигляді, який не може бути оброблений людиною, – вона інтегрована в модель і її навіть неможливо виокремити.

Отже, концепція СППР потребує побудови моделей іншого класу, таких, які дають змогу отримувати інформацію про проміжні кроки прийняття рішень. Зокрема в контексті такого завдання важливою є інформація про ризикову складову, яку можна було б проаналізувати окремо від, наприклад, інших експлуатаційних витрат.

#### Формулювання цілей

Метою дослідження є формування моделей для удосконалення процесу керування сортувальними станціями з метою підвищення відсотка вчасно доставлених відправлень і зменшення штрафних виплат з боку залізниці.

Викладення основного матеріалу дослідження

Пропоновано модель, яка буде застосовувати нейронні мережі, однак вона також має містити окрему модель ризику. Нейронна мережа буде використана для визначення поточної затримки вагона, виходячи з пройденого та залишкового шляху, а також витраченого і залишкового часу. Для більшої точності ця мережа буде видавати результат у вигляді інтервального або нечіткого числа. З іншого боку, система АСК ВП УЗ Є має достатню інформації для приблизного оцінювання часу прибуття вагона до станції призначення, хоча, можливо, і на основі тривіальних приблизних розрахунків, а може, і з урахуванням більш детальної інформації з поїзної і вагонної моделей полігона. Отже, знаючи строк доставлення вантажу, на основі прогнозованої інформації системи АСК ВП УЗ Є про час прибуття вагона можна також оцінити поточну затримку вагона. Ця оцінка зазвичай може бути дуже приблизною, тобто вона може лише приблизно оцінити верхню і нижню межі часу запізнення, а отже, фактично є інтервальним числом. Але цією інформацією також не можна нехтувати, її слід урахувати для підвищення точності моделі ризику, адже в умовах невизначеності будь-яка інформація є неабиякою цінністю.

Отже, постає завдання, як одночасно урахувати прогнозовану інформацію з нейромережі та системи АСК ВП УЗ Є. Як відомо, окрім підходів теорії ймовірності, існують альтернативні підходи та погляди щодо поняття ймовірності та альтернативні теорії. Існує, наприклад, баєсівський підхід до ймовірнісного моделювання, заснований на оновленні ймовірностей при отриманні нової інформації. У цьому підході ймовірність інтерпретують як ступінь впевненості у якійсь події чи гіпотезі. Початкові ймовірності (апостеріорні) переглядають у світлі нових даних, щоб отримати оновлені ймовірності (апостеріорні). Отже, баєсівський підхід дає змогу гнучко змінювати оцінку ймовірності події з надходженням нової інформації. Теорія Демпстера-Шафера (англ. Dempster-Shafer Theory, DST) є узагальненням класичної теорії ймовірностей і баєсівського підходу, даючи змогу працювати з невизначеністю і неповною інформацією більш гнучко. На відміну від традиційних ймовірнісних методів, теорія Демпстера-Шафера розподіляє «масу» не тільки на окремі події, але і об'єднання подій, що особливо корисно, коли не вистачає даних для точного визначення ймовірностей. У теорії Демпстера-Шафера ймовірність замінено функцією маси (або мас-функцією), яка розподіляє ймовірність не тільки на окремі гіпотези, а й їхні об'єднання. Мас-функція (також Belief function, або функція впевненості) визначає нижню межу впевненості в події, засновану на наявній інформації.

І якщо в баєсівському підході кожна можливість точно визначена і оновлена з урахуванням нових даних, то в теорії Демпстера-Шафера невизначеність може бути гнучкішою, розподіляючи ймовірність між множинами подій, що особливо корисно під час роботи з неповною чи неточною інформацією. Баєсівський підхід оновлює ймовірності

на основі нових даних, але потребує точних апріорних ймовірностей, натомість теорія Демпстера-Шафера дає змогу комбінувати інформацію з різних джерел без необхідності в точних апріорних ймовірностях.

Припустимо, ми маємо два джерела інформації про те, що вантажний вагон може запізнитися. Перше джерело каже, що ймовірність запізнення становить 30 %, друге – 50 %. У баєсівському підході ми спробували б оновити ймовірності на основі додаткової інформації, що може бути складно, якщо джерела суперечать одне одному. У теорії Демпстера-Шафера ми можемо розподілити масу ймовірності між множинами подій (наприклад «вагон запізниться» і «вагон не запізниться»), комбінуючи інформацію від обох джерел і вирішуючи конфлікти, щоб отримати більш обґрунтовану оцінку.

Отже, теорія Демпстера-Шафера розширює можливості баєсівського підходу, надаючи інструменти для роботи з більш складними та невизначеними даними, що робить її корисною в умовах неповної чи суперечливої інформації.

Правило комбінації Демпстера є центральним елементом теорії Демпстера-Шафера, його використовують для об'єднання різних джерел інформації, поданих у вигляді мас-функцій. Воно дає змогу агрегувати і оновлювати ступені впевненості за наявності кількох незалежних джерел даних. Ключовим моментом правила Демпстера є також урахування суперечливості інформації.

Розглянемо застосування правила Демпстера на прикладі. Припустимо, що оцінка АСК ВП УЗ Є про запізнення вагона становить від 1 до 11 год. Подано її як трикутне нечітке число. Також припустимо, що є оцінка, отримана з нейронної мережі, вона вже вказує на інтервал від 2 до 6 год. Слід зазначити, що Артур Пентланд Демпстер, один з засновників теорії та професор Гарвардського університету, безпосередньо не узагальнив це правило на нечіткі числа, хоча саме багатовимірні статистика була одним із його головних інтересів. Але підходи до застосування правила Демпстера до нечітких множин і нечітких чисел можна зустріти в роботах його послідовників. Хоча також слід зазначити, що існують також різні підходи і погляди на це питання. І взагалі теорія Демпстера-Шафера має багато невирішених проблем унаслідок її складності і важкості для розуміння. Але саме ця теорія дає можливість розв'язувати надскладні задачі зі статистики та обробки інформації, які неможливо якісно розв'язати в рамках традиційних підходів.

Отже, якщо  $\tilde{C}$  – це нечітке число, отримане в результаті композиції двох нечітких чисел за правилом Демпстера, то функція  $\mu_{\tilde{C}}$  в контексті

такої задачі може являти собою мас-функцію впевненості в запізненні вагона. Тобто це функція розподілу впевненості в запізненні вагона. Теоретично ми можемо використовувати поняття впевненості як аналог поняття ймовірності в контексті застосування підходу до визначення ризику, як добуток ймовірності запізнення і величину штрафу.

Однак, слід зазначити, що, хоча ми можемо фактично користуватися поняттям впевненості як аналогом поняття ймовірності, воно має суттєві відмінності, особливо в контексті використання мас-функцій. Хоча рівень впевненості, як і величина ймовірності, не може перевищувати значення 1, жодних обмежень на нього не накладено, на відміну від поняття ймовірності. У класичній теорії ймовірностей кожен ймовірнісний простір (або ймовірнісне поле) має підкорятися такому правилу: сума ймовірностей усіх елементарних результатів має дорівнювати 1. Це відображає принцип, що одна з можливих подій обов'язково відбудеться. Наприклад, для набору подій

$$P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots + P(A_n) = 1. \quad (1)$$

Це обмеження забезпечує коректність ймовірнісної моделі та гарантує, що ймовірність будь-якого результату знаходиться в межах від 0 до 1.

У теорії Демпстера-Шафера використовують мас-функції, які розподіляють «масу впевненості» не лише на окремі події, а і їхні об'єднання. Однією з ключових особливостей мас-функцій є те, що сума всіх мас може бути менше 1. Це дає змогу враховувати невизначеність та неповноту інформації.

Отже, коли ми говоримо про нечіткі числа в контексті теорії Демпстера-Шафера, потрібно враховувати, що функція належності може мати площу, що перевищує 1, але мас-функція має бути нормалізована так, щоб її значення відповідали вимогам теорії.

У теорії Демпстера-Шафера дійсно можна розподіляти масу впевненості серед різних гіпотез, і сума мас усіх підмножин (включаючи порожню множину) має дорівнювати 1. Однак важливо враховувати, що це не заважає сумі впевненості за окремими гіпотезами перевищувати 1, оскільки маси можуть призначатися і об'єднанням гіпотез також. Отже, до отриманого нечіткого числа необхідно застосувати операцію нормалізації. З урахуванням вищевказаного та логіки Демпстера [7] правило композиції інформації з двох джерел, яка задана нечіткими числами, виглядає як

$$\left(m_{\tilde{A}} \oplus m_{\tilde{B}}\right)_{\tilde{C}} = N\left[\mu_{\tilde{C}}\left(t_3\right)\right] = N\left[\frac{\sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{C}} \mu_{\tilde{A}}\left(t_3\right) \cdot \mu_{\tilde{B}}\left(t_3\right)}{1 - \sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{\emptyset}} \mu_{\tilde{A}}\left(t_3\right) \cdot \mu_{\tilde{B}}\left(t_3\right)}\right], \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{C}}\left(t_3\right)}. \quad (3)$$

де  $t_3$  – змінна тривалості затримки доставлення вантажу;

$\mu_{\tilde{A}}\left(t_3\right), \mu_{\tilde{B}}\left(t_3\right)$  – функції належності нечітких чисел  $\tilde{A}$  (прогнозна інформація з АСК ВП УЗ Є) і  $\tilde{B}$  (прогнозна інформація з нейронної мережі);

$\tilde{C}$  – нечітке число, яке є результатом агрегації нечітких чисел  $\tilde{A}$  і  $\tilde{B}$ , за правилом Демпстера, з відповідною функцією належності  $\mu_{\tilde{C}}\left(t_3\right)$ , яка відіграє роль мас-функції;

$N[\dots]$  – операція нормалізації функції належності;

$\left(m_{\tilde{A}} \oplus m_{\tilde{B}}\right)_{\tilde{C}}$  – результат композиції у вигляді мас-функції, що подана як нормалізована функція належності нечіткого числа  $\tilde{C}$ ;

$\tilde{\emptyset}$  – пуста нечітка множина.

Нормалізація фактично передбачає помноження функції належності отриманого нечіткого числа на нормалізуючий коефіцієнт, який можна обчислити як

Загалом теорія Демстера-Шафера складна і цікава, але поки що фактично експериментальна теорія, яка не є вільною від різноманітних суперечливостей. До композиції мас-функцій, поданих як функції приналежності, можна запропонувати декілька різних підходів. Ми вважаємо, що застосований нами підхід саме і є найбільш зручним і раціональним, який можна назвати підходом з нормалізацією після композиції. Але в принципі можна здійснювати нормалізацію і функцій належності, які беруть участь у композиції ще до виконання цієї операції. Перевагою такого підходу є гарантування, що кожна вихідна функція належності інтерпретована як мас-функція, що і відповідає вимогам теорії Демпстера-Шафера. Однак ми вважаємо, що такий підхід не гарантує того, що отримана функція належності все одно не буде потребувати нормалізації. За винятком якихось часткових випадків нормалізація все одно буде потрібна. А отже, у контексті задачі оперативного керування сотрувальною станцією, у ході виконання процедури оптимізації математичної моделі керування станцією, яка, наприклад, використовує генетичний алгоритм, багато разів у ході ітерацій будуть здійснені перерахунки прогнозних часів затримок за кожним вагоном для визначення величини ризику недотримання строку доставлення вантажів. Тож такий підхід до композиції є менш зручним і раціональним саме в контексті розв'язання цієї задачі. До того ж підхід із нормалізацією після комбінації дає змогу працювати з вихідними нечіткими числами безпосередньо, що є також його перевагою. На рис. 1 подані зі своїми функціями належності вихідні нечіткі числа  $\tilde{A}$  і  $\tilde{B}$  та нечітке число  $\tilde{C}$ , що є композицією цих чисел, за правилом Демпстера, але до виконання процедури нормалізації.

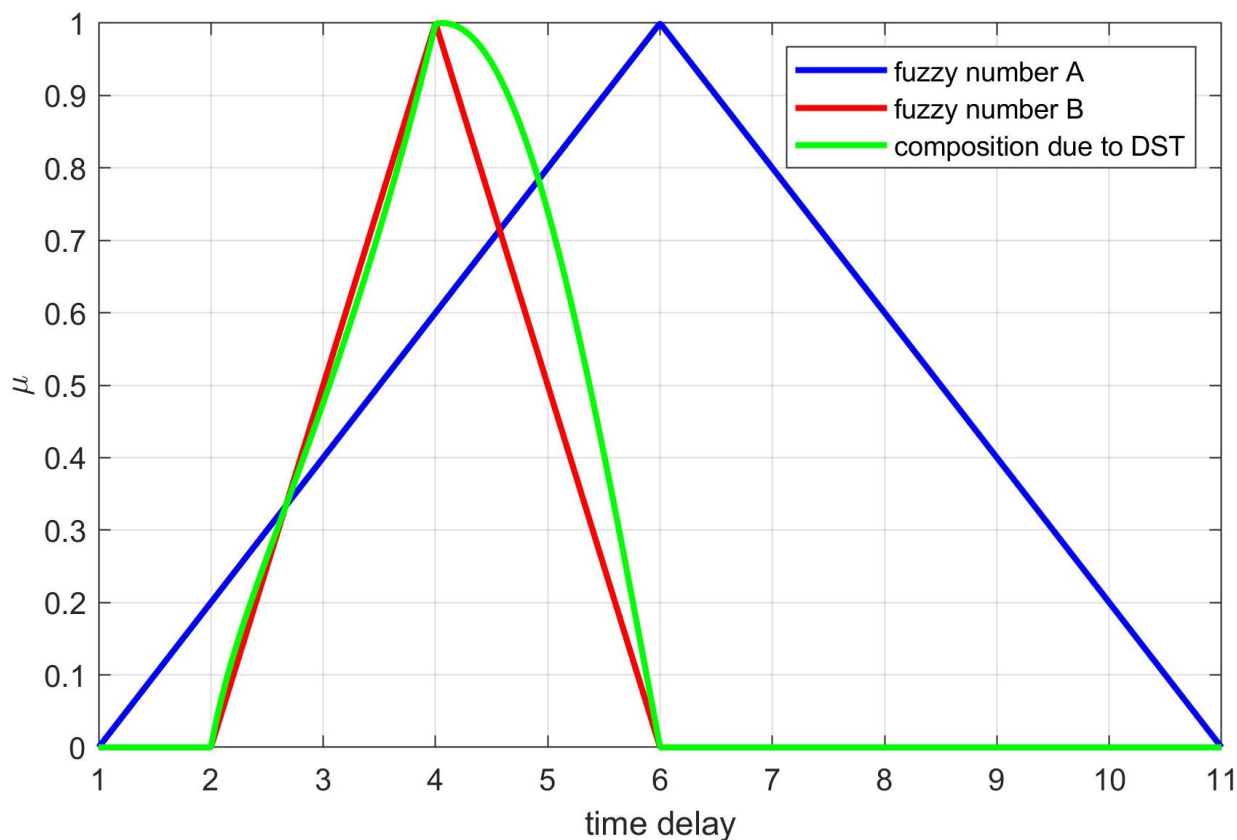


Рис. 1. Нечіткі числа, що є прогнозними даними системи АСК ВП УЗ Є і нейромережі щодо впевненості в недотриманні строку прибуття певного вагона на станцію розвантаження, і нечітке число, що являє собою композицію цих нечітких чисел, за правилом Демпстера, але до виконання процедури нормалізації

На рис. 2 наведено нечітке число, отримане в результаті композиції, подане як функція належності після здійснення процедури нормалізації та результат його дефазифікації за методом центроїд. Тепер функція належності є мас-функцією, яка повністю задовольняє вимоги теорії Демпстера-Шафера.

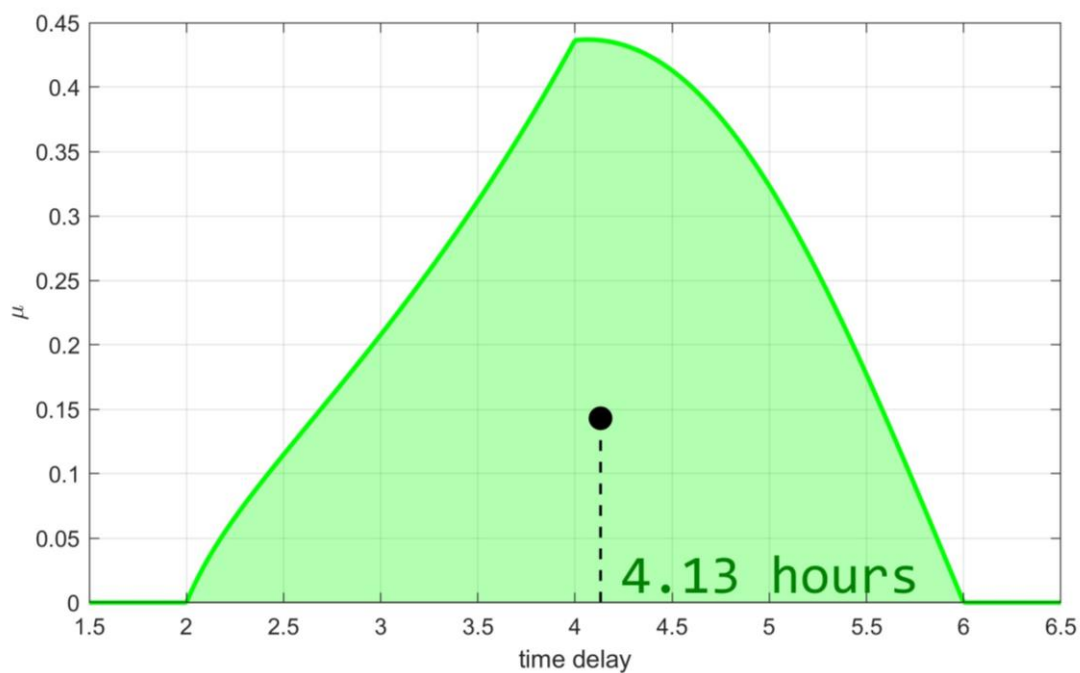


Рис. 2. Архітектура повнозв'язної нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу

Слід зазначити, що фактично в результаті здійснення композиції ми маємо не лише ймовірність настання події запізнення, а функцію розподілу, яка фактично співставляє значенням часу запізнення їхні рівні впевненості. Цю впевненість можна трактувати як імовірність, тим паче що мас-функція фактично задовольняє всі відповідні обмеження теорії імовірностей. Отже, ми маємо не лише впевненість у тому, що подія запізнення настане, але й фактично ми маємо інформацію про час запізнення; можемо побудувати більш складну і точну модель визначення величини ризику, застосувавши нетривіальний підхід. Однак, якщо поглянути на цю мас-функцію детальніше, то стає зрозуміло, враховуючи її безперервну природу, що її можна інтерпретувати не як безпосередньо функцію імовірності, а лише як функцію щільності імовірності.

Тоді добуток мас-функції і штрафної функції матиме розмірність гривня за годину (грн/год), і його можна назвати щільністю ризику:

$$\rho(t_3) = m_{\tilde{C}}(t_3) \Upsilon(t_3, E). \quad (4)$$

Тоді функцію ризику можна визначити як

$$R(t_3) = \int_0^{+\infty} m_{\tilde{C}}(t_3) \Upsilon(t_3, E) dt_3, \quad (5)$$

$$\Upsilon(t_3) = \begin{cases} 1000 \cdot 0,01 t_3 & , \text{якщо } 0 \leq t_3 \leq 24 \\ 1000(0,24 + 0,015(t_3 - 24)) & , \text{якщо } 24 < t_3 \end{cases} \quad (6)$$

В абсолютній аналітичній формі її можна записати як

$$\Upsilon(t_3) = 2,5 t_3 |t_3 - 24| + 12,5 t_3 - 60. \quad (7)$$

$$m(t_3) = \begin{cases} 0 & , \text{якщо } t_3 < -1 \\ (t_3 + 1)/14 & , \text{якщо } -1 \leq t_3 \leq 13 \\ (27 - t_3)/14 & , \text{якщо } 13 < t_3 \leq 27 \\ 0 & , \text{якщо } t_3 > 27 \end{cases} \quad (8)$$

де  $m_{\tilde{C}}(t_3)$  – мас-функція впевненості в затримці вагона;

$\Upsilon(t_3, E)$  – функція штрафу за недотримання строку доставлення вантажу;

$E$  – провізна плата.

Такий підхід до визначення ризику є дуже зручним, адже якщо б ми спочатку інтегрували функцію щільності імовірності, а потім перемножували її на якусь сталу величину наслідків, то такий тривіальний підхід у контексті цієї задачі є абсолютно некоректним, бо він щонайменше не враховує тривалість запізнення, і виправданий лише у випадку, якщо нараховують фіксовану суму штрафу лише за фактом наявності затримки. У нашому ж випадку величина штрафу залежить від величини затримки вагона, до того ж ця залежність може бути нелінійною. Отже, запропонована модель (4) враховує всі можливі варіанти розвитку подій і відповідні до них величини штрафів одночасно.

Розглянемо приклад. Провізна плата становить 1000 грн. Штрафна функція передбачає виплату 1 % суми провізної плати за кожну годину затримки протягом першої доби затримки, а починаючи з другої доби – 1,5 % суми провізної плати за кожну годину затримки. Функція втрат або штрафу у кусково-лінійній формі запису може бути записана як

Мас-функція впевненості в запізненні вагона подана нормованою трикутною функцією належності

Вочевидь, в абсолютній аналітичній формі цю функцію можна записати як

$$m(t_3) = \frac{|t_3 + 1| - 2|t_3 - 13| + |t_3 - 27|}{392}. \quad (9)$$

На рис. 3 наведені графік штрафної функції (1) і графік мас-функції впевненості в запізненні вагона (2).

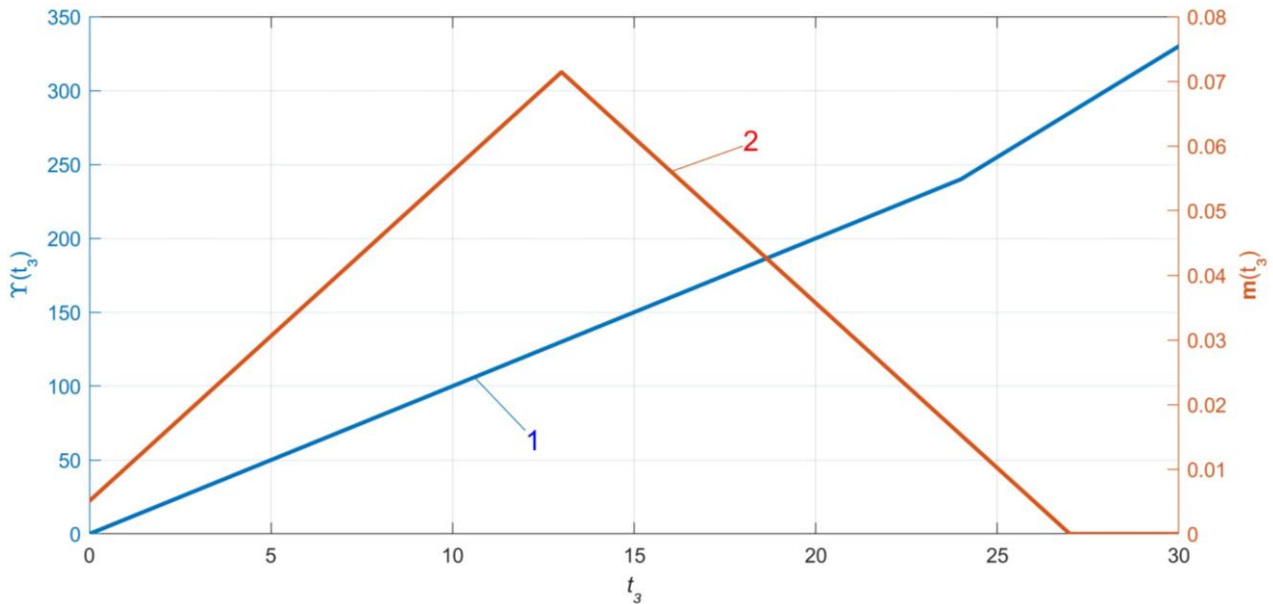


Рис. 3. Штрафна функція (1) і мас-функція впевненості в запізненні вагона (2)

На рис. 4 наведено функцію щільності ризику, яка є добутком штрафної функції та мас-функції впевненості.

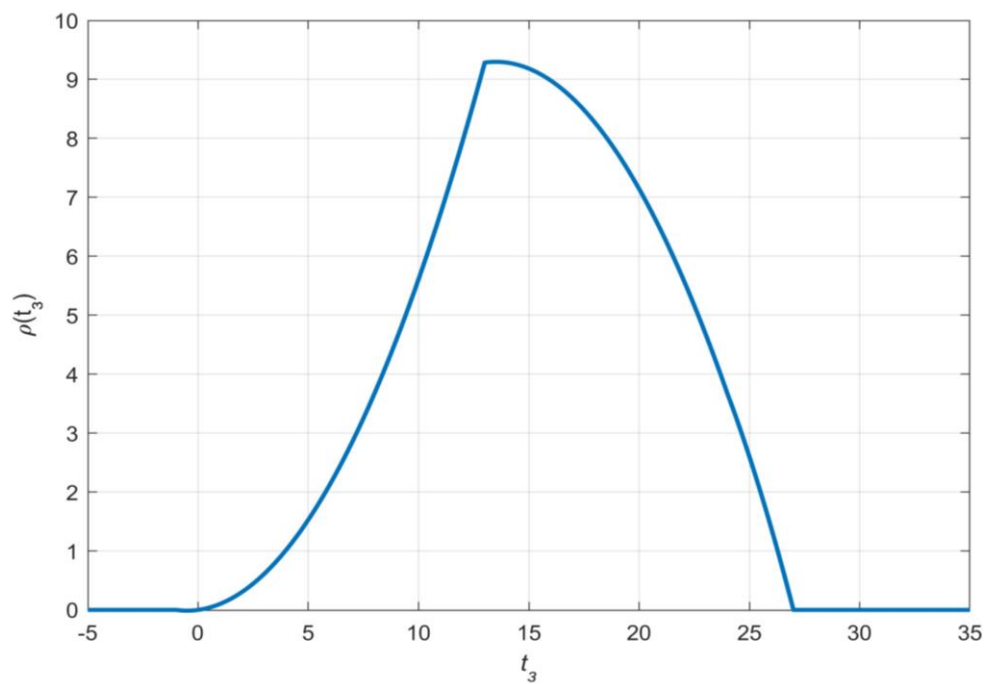


Рис. 4. Функція щільності ризику



Розрахувати величину ризику можна через інтеграл від функції щільності ризику:

$$\begin{aligned}
 R(t_3) &= \int_0^{+\infty} m(t_3) Y(t_3, E) dt_3 = \\
 &= \int_0^{+\infty} \frac{1}{392} (|t_3 + 1| - 2|t_3 - 13| + |t_3 - 27|) (2,5t_3 |t_3 - 24| + 12,5t_3 - 60) dt_3 = \\
 &= (-0,0042517(t_3^3 + 1,5t_3^2 + 3,33067 \cdot 10^{-15}t_3 - 0,5)(\operatorname{sgn}(-t_3 - 1) - 1) \times \\
 &= (\operatorname{sgn}(13 - t_3) + 1) + 0,0042517(t_3^3 - 40,5t_3^2 - 8,99281 \cdot 10^{-14}t_3 + 2197,5) \times \quad (10) \\
 &= (\operatorname{sgn}(13 - t_3) - 1)(\operatorname{sgn}(24 - t_3) + 1) + \\
 &= 0,0063776(t_3^3 - 52,5t_3^2 + 648t_3 - 4007)(\operatorname{sgn}(24 - t_3) - 1)(\operatorname{sgn}(27 - t_3) + 1) - \\
 &= 65,0574 \operatorname{sgn}(27 - t_3) + 65,0574 \Big|_0^{+\infty} = 130,12 \text{ грн}
 \end{aligned}$$

Отже, за провізної плати 1000 грн величина ризику становила 130,12 грн. За проведених розрахунків величини ризику з використанням поняття щільності ризику вдалося адекватно врахувати невизначеність і нелінійні наслідки затримок. Результати показали, що отримана величина ризику реалістично відображує вплив різних значень часу запізнення на загальну суму штрафів. Метод виявився ефективним для моделювання та оцінювання ризиків, пов'язаних із затримками вантажних вагонів.

## Висновки

У статті подано комплексну модель оцінювання ризику запізнення вантажних вагонів, засновану на застосуванні теорій нечітких чисел і Демпстера-Шафера. Час запізнення вагона було змодельовано як нечітке число, що дало змогу врахувати варіабельність і невизначеність цього параметра. Нормалізація функції належності дала можливість використати її як мас-функцію впевненості, за теорією Демпстера-Шафера, і забезпечила можливість коректного застосування інтеграційних методів для обчислення ризику. Введення поняття щільності ризику, визначеного як добуток нормалізованої функції належності та штрафної функції, дало змогу інтегрувати ймовірності та наслідки подій для обчислення загального ризику, пов'язаного з затримками.

Обчислення очікуваного ризику через інтеграл щільності ризику показало, що отримана величина адекватно відображує реальні умови та наслідки затримок. Модель виявилася гнучкою і точною, даючи змогу одночасно враховувати різні сценарії затримок і їхні наслідки. Розроблена модель

об'єднання інформації з двох джерел про час запізнення вагона була заснована на теорії Демпстера-Шафера та нечітких числах, що дало змогу ефективно комбінувати дані, отримані з різних джерел, і покращити точність прогнозування часу запізнення і його наслідків.

Методологію розробляли в рамках завдання підвищення частки вантажних залізничних перевезень з дотриманням строку доставлення вантажів і проблеми підвищення якості та рівня автоматизації процесу оперативного планування технічних станцій. Однак така розробка може бути корисною для різних додатків, включаючи логістику, керування ланцюгами постачань і проектне управління. Модель забезпечує більш точне та реалістичне оцінювання ризиків, пов'язаних із невизначеністю і нелінійними наслідками затримок. Отримані результати підтвердили адекватність і ефективність розробленого підходу, що відкриває нові можливості для практичного застосування в аналізі ризиків у процесі керування вагонопотоками.

Список використаних джерел

1. Zheng Ch., Shen Y., Ma J., Gui L., Zhang Ch. Robust Optimization of Transport Organization for China Railway Express. *Applied Sciences*. 2024. 14(1). 137.
2. Licciardello R., Adamko N., Deleplanque S., Hosteins P., Liu R., Peterson A., Wahlborg M., Zat'Ko M., Pellegrini P. Integrating yard, network and optimisation models towards real-time optimisation of rail freight yard operations. *Scienza e tecnica*. 2020. 6. P. 417–440.
3. Dimitrov L., Purgic S., Tomov P., Todorova M. Approach for Development of Real-Time Marshalling Yard Management System. 2018

- International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*. 2018.
4. Trafikverket. Real-Time Yard Management: D2.1 Description of automation optimization requirements and capabilities of decision making process in Marshalling yards and Terminals. *Shift2Rail Joint Undertaking*. 2017. 73 p.
  5. Tomov P., Purgic S., Dimitrov L., Todorova M. Optimization of the Wagons Sorting Process for Needs of Real-Time Marshalling Yard Management System. *II International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*. 2019.
  6. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 45–54.
  7. Surathong S., Auephanwiriyakul S., Theera-Umpon N. Incorporating fuzzy sets into dempster-shafer theory for decision fusion. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. 15(Special Issue 3). P. 299-309.

Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu., Kofanov O. V. Forming a Risk Model for Ensuring Cargo Delivery Deadlines under Uncertainty Using Fuzzy Set Theory and Dempster-Shafer Theory

Ensuring timely cargo delivery is a crucial aspect of transportation, and a significant role in this matter is played by railway technical stations as they manage the process of handling freight car flows. The complexity of solving this problem is due to the presence of numerous uncertainty factors that can significantly affect decision-making processes. Traditional management methods complicate their assessment and consideration in managerial decisions. This article addresses the problem of assessing the risks of train delays and the need to develop modern models to solve it.

The study proposes a methodology and model for assessing the risk of train delays using the theory of fuzzy numbers and Dempster-Shafer theory, which allows for considering variability and uncertainty in forecasts. An analysis was conducted on uncertainty factors that may complicate the processes of handling and forming trains, as well as on car parameters that need to be considered to minimize risks and reduce financial losses for railway carriers.

The article proposes a methodology for calculating the expected risk based on the integration of various delay time values and associated consequences. A model was also developed for combining delay time information from various sources, which contributes to improving the accuracy of forecasts and the efficiency of operational planning.

The conclusions of the article emphasize the importance of the proposed model for automating the

management process of technical and sorting stations, which will minimize delivery delays and reduce the volume of penalty payments by railway enterprises.

Keywords: ensuring cargo delivery deadlines, forecasted train delay time, Dempster-Shafer theory, automation of technical station management, uncertainty, risk density function.

*Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.*

*E-mail: [parhomenko@kart.edu.ua](mailto:parhomenko@kart.edu.ua).*

*Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.*

*E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua).*

*Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.*

*E-mail: [bulavina\\_ty@ukr.net](mailto:bulavina_ty@ukr.net).*

*Кофанов Олександр Володимирович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: [alex.vonaf@gmail.com](mailto:alex.vonaf@gmail.com).*

*Parkhomenko Larysa, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: [parhomenko@kart.edu.ua](mailto:parhomenko@kart.edu.ua).*

*Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua).*

*Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: [bulavina\\_ty@ukr.net](mailto:bulavina_ty@ukr.net).*

*Kofanov Oleksandr, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: [alex.vonaf@gmail.com](mailto:alex.vonaf@gmail.com).*