

УДК 656.2

ПАРХОМЕНКО Л.О., к.т.н., ПРОХОРОВ В.М., к.т.н., КАЛАШНІКОВА Т.Ю., к.т.н., ОВСЯННІКОВ Д.О., (Український державний університет залізничного транспорту)

Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності.

Забезпечення своєчасної доставки вантажів є ключовим моментом перевізного процесу і вирішальну роль в цьому питанні повинні грати залізничні технічні станції, так як саме вони керують процесом обробки вагонопотоків. Складність вирішення цієї проблеми полягає в наявності низки факторів невизначеностей, які мають потенційний вплив на процес прийняття рішень, але згідно до традиційних технологій управління їх взагалі дуже важко оцінити, а тим паче врахувати при прийнятті управлінських рішень. Стаття присвячена проблемі ідентифікації факторів, які необхідно першочергово враховувати при прийнятті рішень, з цією метою було запропоновано модель визначення пріоритетності обробки вагонів на залізничних технічних станціях з метою подальшої автоматизації процесу управління.

Були проаналізовані як фактори невизначеності, що можуть ускладнювати процеси обробки та формування поїздів та їх просування залізничною мережею, так і параметри вагонів, за якими доцільно визначати пріоритетність обробки вагонів з метою забезпечення своєчасної доставки вантажів та зменшення збитків залізничних перевізників. Стаття пропонує рішення у вигляді нейромережевої моделі, спеціально розробленої для визначення пріоритетності обробки вагонів.

Основні функціональні блоки моделі включають в себе вхідний шар, що враховує різні фактори, такі як затримка, залишковий час, величина штрафу тощо. Приховані шари обчислюють взаємодію цих факторів, а вихідний шар генерує оцінки пріоритету для кожного вагона.

Модель класифікує вагони за чотирма класами пріоритетності: звичайний, середній, високий та винятковий і визначає величину абсолютного пріоритету. Такий підхід дозволяє максимально точно прогнозувати чутливість процесу обробки вагонів до керуючих дій з метою забезпечення для максимальної кількості вагонів можливості "наздогнати" графік та уникнути штрафних санкцій.

Висновок статті вказує на важливість розробленої моделі для подальшої автоматизації процесу управління технічними станціями з метою уникнення затримок у доставці вантажів та штрафних санкцій.

Ключові слова: дотримання терміну доставки вантажів, пріоритетність обробки вагонів, автоматизація управління технічною станцією, невизначеність, нейромережева модель.

Постанова проблеми.

Залізниця є важливим ланцюжком логістичного вантажного транспорту, а ефективне управління обробкою вагонів на станціях має критичне значення для забезпечення надійності процесу перевезень. І якщо нещодавно одними з основних проблем на мережі АТ Укрзалізниця були нестача рухомого складу: вантажних вагонів і локомотивів, то зараз стрімко набирає оберти інша проблема – невиконання термінів доставки вантажів. Звісно фактор війни є однією з причин даної проблеми. Але також слід констатувати той факт, що проблема недотримання термінів доставки вантажів не є наслідком проблеми нестачі рухомого складу, адже ця проблема більшою мірою все ж таки була останніми роками вирішена. Тому слід визнати, що основною складовою проблеми недотримання термінів доставки вантажів,

звісно попри фактор війни, є все ж таки неефективне оперативне управління перевізним процесом на залізниці.

Задача визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях постає внаслідок ряду факторів та викликів, що виникають у сучасних логістичних процесах. Декілька ключових моментів, які призвели до постановки цієї задачі, можуть бути такими:

1. Оптимізація логістичних потоків: зростання обсягів вантажоперевезень на залізницях призводить до потреби в оптимізації логістичних потоків; визначення пріоритетів у обробці вагонів може сприяти ефективнішому розподілу ресурсів та зниженню затримок.

©ПАРХОМЕНКО Л.О.,ПРОХОРОВ В.М., КАЛАШНІКОВА Т.Ю., ОВСЯННІКОВ Д.О.2024

2. Підвищення конкурентоспроможності: залізничний транспорт конкурує з іншими видами транспорту; швидке та точне сортування вагонів дозволяє залізницям забезпечувати високу якість обслуговування, що є ключовим фактором для залучення клієнтів та підтримки конкурентоспроможності.

3. Мінімізація штрафів: штрафи за порушення термінів доставки вантажу можуть становити значну частину витрат для залізничних компаній; ефективне визначення пріоритетності дозволяє уникнути збільшення штрафів і збільшує фінансову стійкість логістичних операторів.

4. Використання сучасних технологій: завдяки розвитку сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та системи штучного інтелекту (AI) стало можливим ефективно використовувати дані для прийняття рішень у реальному часі, що важливо для оптимізації обробки вагонів.

Отже, постановка цієї задачі базується на потребі покращення логістичних процесів, забезпечення високої якості обслуговування та вирішенні фінансових викликів, що виникають у залізничних перевезеннях.

Таким чином, актуальною є проблема пріоритетності обробки вагонів на залізничній станції і побудова автоматизованої системи, яка враховуватиме всі важливі фактори впливу для ефективного прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми визначення пріоритетності обробки вагонів на технічних стаціях є специфічними і дуже залежать від системи організації вагонопотоків. Тому науковий інтерес до даної теми є не дуже високим у західних розвинених країнах, особливо в тих, де працюють багато дрібних операторів, натомість більший інтерес можна спостерігати в країнах Східної Європи та Азії, тобто в тих країнах, в яких або система організації вагонопотоків схожа з радянською, або вона взагалі ще знаходиться на стадії розвитку. Прикладом цього є стаття [1], що опублікована саме в малайзійському науковому журналі. Оригінальність статті полягає в застосуванні математичного підходу — моделі пріоритетного цільового програмування — для вирішення завдань перепланування руху по залізниці. Цей підхід дозволяє ефективно враховувати вимоги оператора та забезпечити оптимальне управління, зменшуючи затримки та підвищуючи надійність обслуговування. Успішне застосування моделі в експерименті на реальній залізничній мережі свідчить про її потенційну застосованість в умовах виникнення подій та затримок, що робить статтю значущою для оптимізації та управління залізничним транспортом. Однак є виключення і серед розвинених західних країн, як ось, наприклад, стаття [2] професорів лондонського університету, яка також висвітлює проблеми затримок і

несвоєчасної доставки вантажів на британській залізниці. Автори вбачають головною причиною цього явища саме проведену у 90-х роках приватизацію галузі. Однак автори переважно розглядають економічні і організаційні чинники цього негативного явища і майже не торкаються технологічних. Цікавою також є стаття [3] китайських дослідників. У статті розглядається оптимізація доставки та вивезення вагонів на залізничну станцію з різною територією обслуговування. Наведено математичну модель та використано алгоритм відпалювання для розв'язання задачі. Виявлено, що алгоритм відпалювання ефективніший за генетичний та алгоритм пошуку табуляції. Проте стаття обмежена вивченням лише районів навантаження і не розглядає можливості прискорення обробки вагонів на технічних станціях. Ще одна подібна стаття [4] присвячена багатоцільовій оптимізації процесу вивезення та розміщення вагонів на станції з врахуванням кількох цільових критеріїв. Використовуючи модель оптимізації з обмеженнями щодо можливостей локомотива та пріоритетів для передачі між ділянками, що обслуговуються, застосовано алгоритм відпалювання для знаходження оптимального рішення. Використано випадок розміщення та вивезення вагонів на залізничній станції для верифікації моделі та алгоритму. Результати свідчать, що модель відповідає вимогам схеми розміщення та вивезення вагонів і ефективність обчислень відповідає потребам залізничної експлуатації. Однак стаття не розглядає аспекти прискорення обробки вагонів на технічних станціях та обмежена аналізом лише гілкоподібних ділянок. Наступна стаття [5] також присвячена оптимізації системи розміщення та вивезення вагонів на гілкоподібній мережі вантажних операцій (PTWS-BSFON) в Китаї. Розглянуто процес операції PTWS з трьох аспектів: підсистема розформування-формування вагонів на технічній вантажній станції, підсистема розміщення місцевих вагонів та підсистема вивезення місцевих вагонів. Розроблено платформу для симуляції двох типових режимів розміщення та вивезення вагонів за допомогою програмного забезпечення Arena. Зазначено ієрархічну структуру стратегій розміщення та вивезення в симуляційній платформі для сценаріїв PTWS-SO та PTWS-SSMS. Результати симуляції на конкретних прикладах свідчать про обґрунтованість методології застосування різних стратегій та покращення ефективності PTWS-BSFON. Однак стаття розглядає питання пришвидшення транспортування вагонів лише переважно в контексті оптимізації місцевої роботи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Як показав аналіз наукових публікацій останніх років, проблема пріоритетності обробки

вагонів на залізничних технічних станціях в них досліджена дуже зверхньо. Останні наукові публікації в області залізничного транспорту та логістики свідчать про те, що проблема пріоритизації обробки вагонів рідко розглядається як окрема і чітко визначена задача. Більшість наявних досліджень концентруються на загальних питаннях оптимізації залізничних перевезень та управління логістичними потоками, не надаючи достатньої уваги специфіці обробки вагонів на технічних станціях.

Недоліки в існуючих дослідженнях полягають у відсутності визначеності у методиках надання пріоритетів для вагонів, враховуючи їхню конкретну ситуацію та потреби. При цьому, систематичний підхід до пріоритизації вагонів, який враховує різноманітні фактори, такі як затримки, залишковий час та штрафи, залишається малодослідженим.

Невизначеність у питанні пріоритизації вагонів ускладнює роботу залізничних компаній та логістичних операторів, які можуть стикатися з непередбачуваними затримками та неефективністю в управлінні транспортними потоками. Крім того, відсутність чіткої методології пріоритизації може призводити до фінансових втрат через штрафні санкції за порушення термінів доставки.

Отже, невирішеність цієї проблеми викликає необхідність подальших досліджень та розробки нових методів пріоритизації обробки вагонів, спрямованих на покращення ефективності та точності управління залізничними перевезеннями.

Формулювання цілей. Метою дослідження є удосконалення процесу управління переробкою вагонопотоків за рахунок формування моделі визначення пріоритетів обробки вагонів на технічних станціях.

Викладення основного матеріалу дослідження.

В сучасних умовах управління залізничними технічними станціями оперативний керівний персонал стикається з рядом викликів, які впливають на ефективність обробки та формування вантажних поїздів. Зокрема, несподівані коливання вантажних потоків та технічні негаразди можуть значно ускладнювати протікання цих процесів.

Динаміка та обсяг перевезень можуть змінюватися, викликаючи нестабільність у роботі станцій. Технічні несправності та аварійні ситуації можуть призводити до непередбачуваних затримок та обмежень у русі поїздів, що ускладнює вирішення задач обробки вагонів. Крім того, планування та координація руху поїздів на мережі може бути викликана неправильними управлінськими рішеннями, що призводить до неефективності та затримок. Кліматичні умови та стан інфраструктури також можуть вносити свій вклад у непередбачувані обставини. Нестабільність вагонопотоків – це також дуже важливий чинник, який значно посилює

ступінь невизначеності і безпосередньо впливає на можливість вагона "наздогнати" графік перевізного процесу, адже у разі ненадання підвищеного пріоритету вагонам певних напрямків і, наприклад, подальшому значному різкому зниженню трафіку вагонів цього або попутних напрямків крізь станцію, швидкість формування составів цього напрямку на станції може значно уповільнитись, що призведе лише до подальшого збільшення відставання цих вагонів від графіка та, як наслідок, недотримки термінів доставки та нарахування штрафів.

У такому контексті виникає необхідність вдосконалення систем управління та впровадження ефективних рішень для прискорення обробки та формування вантажних поїздів. Застосування нейромережевих моделей допомагає вирішити ці виклики, дозволяючи автоматизувати та оптимізувати процеси управління на технічних станціях, забезпечуючи при цьому швидкість та ефективність обробки вагонів у невизначених умовах.

Перший та вирішальний фактор у визначенні пріоритету обробки та відправлення вагона у системі залізничних перевезень - це поточна затримка. Для обчислення цього показника використовується різниця між фактичним часом прибуття вантажу до пункту призначення та тим, що було розраховано на початку маршруту. При цьому враховується поточне місцезнаходження вагона, відстань до пункту призначення та поточна швидкість для конкретної категорії поїздів.

Другий аспект, який слід враховувати, - це залишковий час, який визначається як різниця між оригінально розрахованим терміном доставки та фактичним часом. Важливо зазначити, що наявність значного залишкового часу має стратегічне значення, оскільки це надає додаткові можливості для вживання заходів щодо вирішення можливих проблем і уникнення надмірного збільшення пріоритету для конкретного вагона.

Третім фактором доцільно обрати величину штрафу, яку буде стягнуто з залізничного підприємства у разі недотримання терміну доставки вантажу. Таким чином, наприклад, з двох вагонів, які мають однаковими всі інші фактори, слід обробляти першим той вагон, за перевезення вантажу якого була сплачена більша провізна плата. Тобто це або дорожчий вантаж, або більша відстань перевезення. Хоча договори або інші нормативні документи, згідно до яких нараховуються сума штрафу, можуть містити й інші умови, але все ж таки основою зазвичай є саме провізна плата.

Вибір математичного апарату нейронних мереж для побудови моделі оцінки пріоритету обробки вагонів визначається їхньою здатністю враховувати складні та нелінійні залежності між різними факторами, які впливають на обробку вагонів на залізничних технічних станціях.

Математична апаратура нейронних мереж дозволяє автоматично визначати оптимальні вагові коефіцієнти для різних факторів вибору порядку обробки вагонів, враховуючи їхню важливість та взаємодію. Це особливо важливо в контексті обробки великої кількості даних та різноманітних вхідних параметрів.

Нейронні мережі підходять для розв'язання задач прогнозування та класифікації, оскільки вони можуть адаптуватися до складних неструктурованих даних та ефективно враховувати взаємозв'язки між різними змінними. Мережі працюють за принципом взаємозв'язаних шарів нейронів, які автоматично навчаються здійснювати передбачення на основі вхідних даних.

При використанні нейронних мереж для моделювання пріоритету обробки вагонів, ми можемо враховувати різні параметри, такі як час затримки, залишковий час слідування, величину штрафу та інші, та навчити модель автоматично визначати їхню вагомість у визначенні порядку обробки.

Такий підхід дозволяє створювати гнучкі та адаптивні моделі, які можуть ефективно працювати зі складними залежностями в даних, що сприяє точнішій та надійнішій оцінці пріоритетів обробки вагонів на залізничних технічних станціях.

У рамках нейромережевої моделі для визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях, процес визначення пріоритету може бути розглянутий як оптимізація вагових коефіцієнтів, які визначають важливість різних факторів у виборі порядку обробки. Модель використовує архітектуру повнозв'язаної нейронної мережі з наступними етапами обробки:

1. на початку, вхідний шар мережі представляє різні фактори, такі як поточна затримка, залишковий час та величина штрафу, які враховуються при визначенні пріоритету обробки вагону;
2. слідом за цим, інформація проходить через приховані шари мережі, де нейрони обчислюють взаємодію різних факторів та їх ваги; ваги налаштовуються під час тренування мережі на історичних даних;
3. на виході мережі розташований вихідний шар, який містить нейрони, які генерують оцінки пріоритетів для кожного вагону; функція активації на цьому шарі вирішує, як ці оцінки враховують фактори;
4. функція втрат оцінює різницю між розрахованим пріоритетом та фактичним пріоритетом на тренувальних даних; мережа намагається мінімізувати цю різницю в процесі навчання.
5. для корекції ваг використовується оптимізатор на основі втрат та градієнтів, зворотне поширення похибок допомагає мережі адаптуватися до змін у вагах для покращення точності прогнозування пріоритету; таким чином, нейромережева модель використовує свою

архітектуру для автоматизованого врахування та оптимізації різних факторів, що впливають на процес розсортування та відправлення вантажів.

На рис. 1. наведено модель на основі архітектури повнозв'язаної нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу, що була сформована для вирішення задачі визначення пріоритетів обробки вагонів. Модель має 3 вхідні і 2 вихідні параметри.

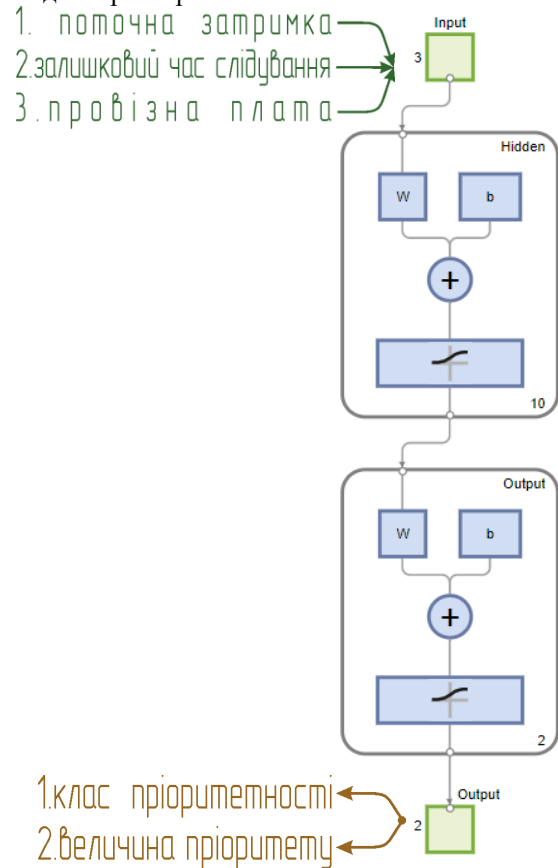


Рис. 1. – Архітектура повнозв'язаної нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу

Обчислення у мережі даної архітектури мають певні особливості. Розрахунок підсумовування ваг для нейрона у прихованому шарі можна виразити формулою:

$$z = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) + b, \quad (1)$$

де n - кількість вхідних параметрів,

w_i - ваговий коефіцієнт, x_i - вхідний параметр,

b - зсув.

У контексті нейронних мереж "зсув" (bias) - це додатковий параметр, який додається до зваженої суми вхідних сигналів перед застосуванням функції активації. Зсув дозволяє

зсувати (зміщувати) результат зваженої суми, що інколи є важливим для коректної роботи нейрона.

Математично, якщо z – зважена сума вхідних сигналів, а b – зсув, то вони входять у функцію активації виглядають так:

$$f(z + b), \quad (2)$$

Зсув дозволяє моделі вивчати зміщення відносно нульового входу і може бути корисним для адаптації до різних умов та навчання оптимальних параметрів нейрону.

У якості функції активації для нейрона у прихованому шарі була застосована логсигмоїдальна функція (logsig), формулу якої можна записати наступним чином:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot z}}, \quad (3)$$

де a – параметр, який контролює нахил (slope) функції активації. Цей параметр може варіюватися і впливати на крутість (steepness) "схилу" функції. Зазвичай a обирається як певна константа (наприклад, $a = 1$), але в деяких випадках він може бути параметром, який підлягає оптимізації під час тренування нейронної мережі.

У вихідному шарі, де h вектор активацій прихованого шару, вихідний сигнал o розраховується аналогічно:

$$o = \sum_{j=1}^m (w_j \cdot h_j) + b, \quad (4)$$

де m – кількість нейронів у прихованому шарі, w_j – ваговий коефіцієнт, h_j – активаційний вихід нейрона у прихованому шарі.

Ці формули допомагають визначити математичний аспект роботи окремого нейрона та мережі в цілому, враховуючи вагові коефіцієнти, функції активації та зсуви.

Згідно до обраної архітектури нейронної мережі було розроблене програмне забезпечення в середовищі Matlab, в ході моделювання та оптимізації структури мережі було встановлено, що створена модель забезпечує якісний результат за умови, що прихований шар містить близько 80 нейронів. На рис. 1 наведено діалогове вікно процесу навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки.



Рис. 2. Діалогове вікно процесу навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки

У ході тренування було отримано наступні графіки, що ілюструють динаміку процесу навчання нейронної мережі. На першому графіку, що представляє динаміку похибок навчання (рис. 3.), дані розділяються на три основні набори: навчальний, тестовий (перевірочний), і валідаційний.

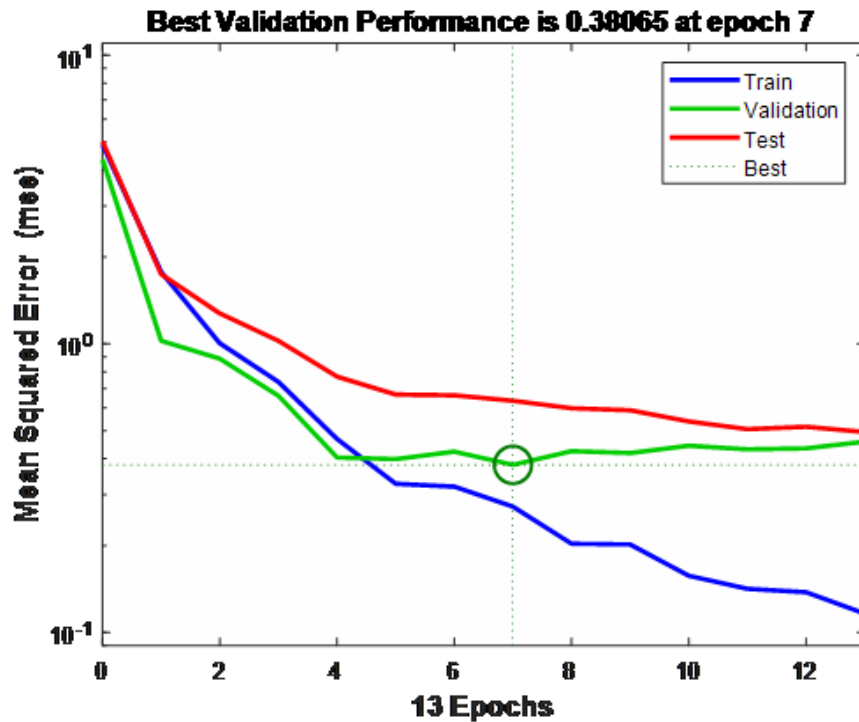


Рис. 3. Динаміка середньоквадратичних похибок в процесі навчання розробленої мережі із застосуванням навчального, валідаційного та тестового наборів даних.

Навчальний набір використовується для навчання самої моделі. Модель адаптується до даних цього набору, обчислюючи градієнт функції втрат і оновлюючи параметри для мінімізації цієї функції.

Тестова вибірка не використовується під час тренування, але використовується для оцінки продуктивності моделі після завершення навчання. Модель оцінюється на тестовій вибірці, щоб визначити, наскільки добре вона узагальнюється на нових, раніше небачених даних.

Валідаційна вибірка використовується для тонкого налаштування параметрів моделі та запобігання перенавчанню. У процесі навчання модель оцінюється на валідаційній вибірці, і отримані результати використовуються для регулювання гіперпараметрів, таких як швидкість навчання. Важливо розділити дані на ці три вибірки для ефективного оцінювання успішності моделі та уникнення перенавчання, що є стандартною практикою в області машинного навчання.

Наступний графік (рис. 4.), який відображає динаміку перевірного набору, дозволяє визначити, як точність чи помилка мережі змінюються на перевірочних даних під час тренування. Це важливо для оцінки того, наскільки ефективно мережа узагальнює свої знання на нових даних.

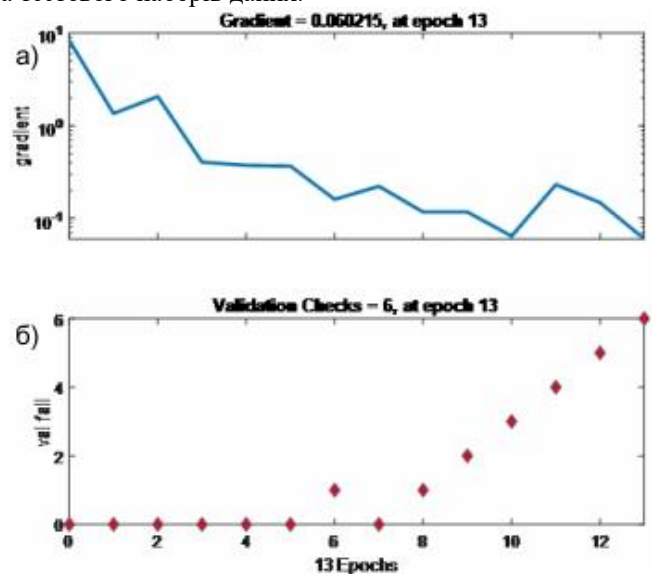


Рис. 4. Динаміка: а) градієнту та б) помилок валідації в процесі навчання розробленої нейронної мережі.

Графік гистограми помилок у процесі навчання нейронної мережі (рис. 5.) відображає розподіл величин помилок між прогнозованими та фактичними значеннями. Важливим аспектом аналізу є спостереження за нормальним розподілом помилок, який вказує на ефективність моделі. Збільшення розбіжності від нормального розподілу може свідчити про проблеми, такі як перенавчання (англ. *overfitting*) або недонавчання (англ. *underfitting*), що впливають на узагальнюючу

здатність моделі до нових даних. Оцінка розподілу помилок та виявлення явищ перенавчання чи недонавчання сприяє оптимізації тренування моделі для досягнення бажаних результатів.

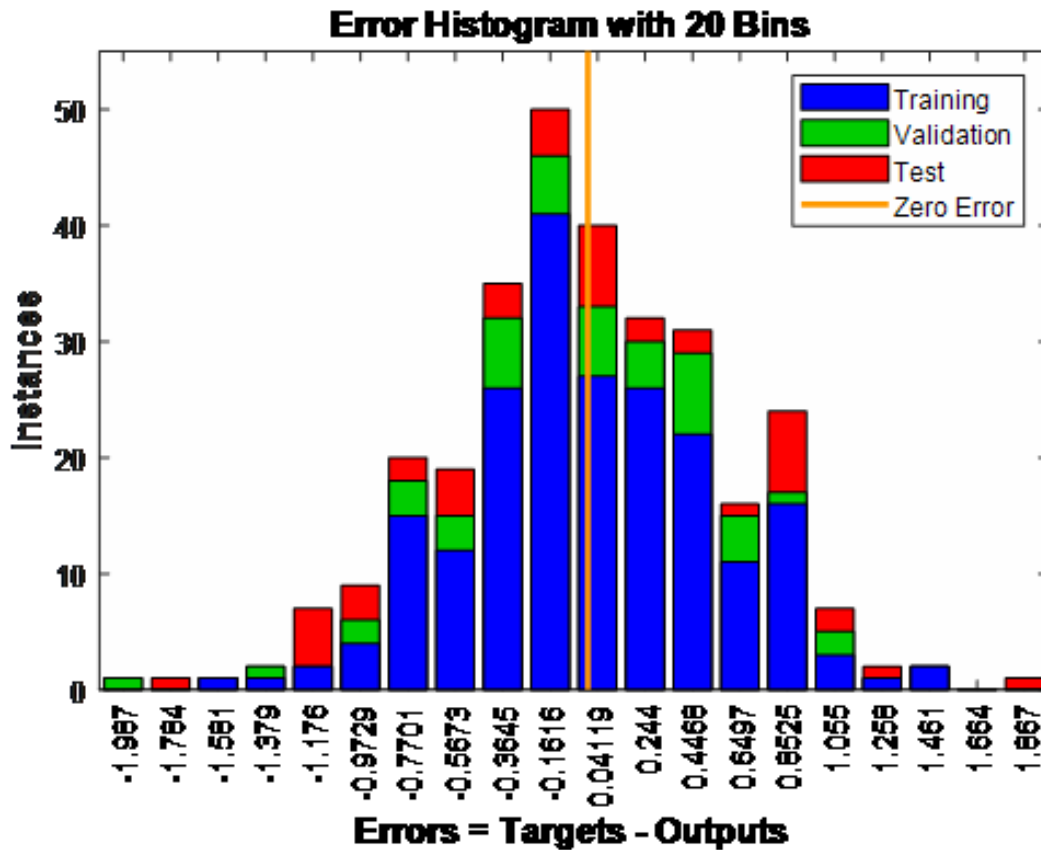


Рис. 5. Гістограма розподілу кількості екземплярів оцінювання вихідних сигналів мережі згідно до величини похибки

На наступному тривимірному графіку (рис. 6.) наведена візуалізація результату класифікації за відповідними рівнями пріоритету екземплярів даних, що представляють інформацію про вантажні вагони на станції.

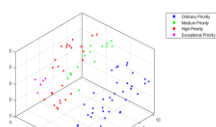


Рис. 6. Візуалізація класифікації вагонів за допомогою нейромережі згідно до чотирьох класів пріоритетності.

Отже було сформовано нейронну модель, призначену для визначення пріоритетності обробки вагонів на залізничних технічних станціях. Ця модель виробляє два ключових параметри, що сприяють управлінню та оптимізації процесами сортування вагонів.

Перший параметр – "клас пріоритетності" – визначає категорію пріоритетності для кожного вагона. Модель класифікує всю множину вагонів на вагони "звичайного пріоритету", "середнього пріоритету", "високого пріоритету" та "виняткового пріоритету". Ця класифікація надає зручний спосіб ідентифікації важливості вагона для технічної станції.

Другий параметр – "величина абсолютного пріоритету" – визначає конкретне числове значення пріоритету для кожного вагона. Цей параметр враховує всі фактори, що визначені моделлю, та вказує на загальне значення важливості вагона, враховуючи всі вагони на станції, що підлягають переробці.

Використання цих двох параметрів робить нашу модель більш ефективною та гнучкою у вирішенні завдань пріоритетного сортування вагонів. Класифікація на кілька категорій допомагає операторам швидше та зручніше керувати потоками вагонів, визначаючи їх важливість. Величина абсолютного пріоритету надає точну кількісну оцінку, що полегшує прогнозування та планування робіт на технічній станції.

Важливо відзначити, що не дивлячись на те, що модель може визначати абсолютний пріоритет для кожного вагона, розширення функціоналу до класифікації на категорії пріоритетності виявилось корисним і обґрунтованим.

По-перше, класифікація вагонів на кілька категорій відображає принцип роботи нейромережі, яка спеціалізується на розподілі об'єктів в конкретні класи в залежності від їх характеристик. Це створює більш нюансовану систему оцінки та керування пріоритетами, що відображає різноманітність факторів впливу на обробку вагонів.

По-друге, класифікація сприяє зручності та наглядності. Вона дозволяє операторам технічних станцій швидко розподіляти вагони за категоріями, що полегшує прийняття оперативних рішень. Маневровим диспетчерам стає легше взаємодіяти з системою, визначаючи пріоритети на основі важливості та певних параметрів, які визначаються мережею.

Отже, вибір використання двох параметрів – класу пріоритетності та абсолютного пріоритету – збільшує функціональність моделі та робить її більш ефективною для потреб сучасних технічних станцій.

Ця модель відіграє важливу роль у контексті подальшої автоматизації управління залізничними технічними станціями. Її впровадження вже на цьому етапі розвитку

забезпечить можливість розробки високоякісних систем підтримки прийняття рішень (СППР) для оперативного управління персоналу.

Модель нейромережі дозволяє здійснювати автоматичний аналіз та класифікацію вагонів за пріоритетами, що робить процес управління більш ефективним і швидким. Таким чином, модель забезпечує можливість оперативному керівному персоналу станцій легко аналізувати, інтерпретувати та використовувати дані, які надає в режимі реального часу система АСК ВП УЗ Є, для прийняття швидких та обґрунтованих управлінських рішень.

Модель також має за мету зменшення ступеня невизначеності при прийнятті рішень щодо порядку обробки вагонів та составів на станції. Справжня складність полягає в тому, що точно не відомо, які саме вагони з терміновою доставкою, у разі зміни порядку обробки, зможуть "наздогнати" графік та уникнути нарахування штрафів. Однак саме нейромережева модель дозволяє максимально точно прогнозувати ці події.

Застосування моделі робить процес управління станцією менш випадковим та забезпечує працівникам більше інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Максимально точні прогнози забезпечують надійну основу для управлінських рішень, що, в свою чергу, сприяє ефективній роботі станції та уникненню можливих штрафів за порушення графіку доставки вантажів.

Отже, сформована модель є важливим кроком у розвитку технологій для залізничної галузі, оскільки вона допомагає покращити оперативні процеси та зменшити залежність від ручного втручання. Її впровадження в системи управління станціями відкриває перспективи для подальших досліджень та розвитку інтегрованих автоматизованих рішень для галузі залізничного транспорту.

Висновки.

Отримані результати визначення пріоритетності обробки вагонів свідчать про важливість оптимізації цього процесу у галузі вантажних залізничних перевезень. У контексті підвищення ефективності та своєчасності доставки вантажів, використання математичної моделі на основі нейронної мережі для визначення пріоритету вагонів виявилось важливим кроком у забезпеченні оптимального управління.

Результати аналізу підтверджують, що оптимізація процесу обробки вагонів, зокрема з урахуванням факторів, які визначають пріоритет, може призвести до зменшення затримок та підвищення загальної ефективності системи залізничних перевезень. Застосування подібної моделі стає важливим інструментом для автоматизації та удосконалення сортування вантажів.

Такий підхід до визначення пріоритетності може мати вагомий вплив на забезпечення якісних та своєчасних перевезень в рамках залізничної логістики. Подальший аналіз та впровадження результатів дослідження може сприяти оптимізації логістичних процесів та поліпшенню обслуговування вантажоперевезень.

Таким чином, сформована математична модель може бути застосована у якості основи при побудові СППР оперативного планування роботи залізничних технічних станцій.

1. Shuib A., Alwadood Z. A Railway Rescheduling Model with Priority Setting. *Pertanika Journal of Science & Technology*. 2017. 25(2). P. 649–660.
2. McCartney S., Stittle J. 'Failing to deliver'—the privatized British rail freight industry. *Public Money & Management*. 2013. 33(5). P. 321–328. <https://doi.org/10.1080/09540962.2013.817115>
3. Guo C., Li S. Optimizing operation of delivering and fetching wagons at a railway station with mixed-shaped goods operation sites. *PLoS ONE*. 2022. 17(1): e0263029. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263029>
4. Guo CJ. Multi-objective optimization model and algorithm for scheme of placing-in and taking-out of wagons in branch-shaped freight operation sites. *China Railway Science*. 2017. 38(1). P. 138–143.
5. Guo CJ. Research on optimization of formulation for shunting operation plan of placing-in and taking out wagons based on phase plan. *Journal of the China Railway Society*. 2019. 41(10). P. 10–16.
6. Wolpert D.H. Stacked generalization. *Neural Networks*. 1992. 5(2). P.241–259.

Parkhomenko L.O., Prokhorov V.M., Kalashnikova T.Yu., Ovsianikov D.O. Development of a Model for Managing Priority in Wagon Processing at Technical Stations under Conditions of Uncertainty.

Ensuring timely cargo delivery is a crucial aspect of the transportation process, with railway technical stations playing a decisive role in handling wagon flows. The complexity of addressing this issue lies in various uncertainty factors that may potentially impact decision-making processes. However, traditional management technologies struggle to accurately assess and incorporate these factors into decision-making. This article addresses the identification of key decision-making factors, proposing a model for determining the priority of wagon processing at railway technical stations, aiming to further automate the management process.

Both uncertainty factors complicating wagon processing, formation, and their movement through the railway network, as well as wagon parameters suitable for determining processing priority to ensure timely cargo delivery and reduce losses for railway carriers, were analyzed. The article proposes a solution in the

form of a neural network model specifically designed to determine wagon processing priority.

The main functional blocks of the model include an input layer considering various factors such as delay, residual time, penalty magnitude, etc. Hidden layers compute the interaction of these factors, while the output layer generates priority estimates for each wagon. The model classifies wagons into four priority classes: ordinary, medium, high, and exceptional, determining the magnitude of absolute priority. This approach allows for accurate forecasting of the sensitivity of the wagon processing process to control actions to ensure that a maximum number of wagons can catch up with the schedule and avoid penalty sanctions.

The article's conclusion emphasizes the importance of the developed model for further automating the management process of technical stations to avoid delays in cargo delivery and penalty sanctions.

Keywords: on-time cargo delivery, wagon processing priority, automation of technical station management, uncertainty, neural network model.

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.

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.

Калашнікова Тетяна Юрїївна, 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.

Овсянніков Денис Олександрович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8944-3490>. E-mail: darkviz228@gmail.com.

Parkhomenko Larisa, 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.

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.

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.

Ovsiannikov Denys, master student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8944-3490>. E-mail: darkviz228@gmail.com.