

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

3 (158)' 2024

ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

INFORMACIJSNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI

Зміст – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту



ПАРХОМЕНКО Л. О., ПРОХОРОВ В. М.,
КАЛАШНІКОВА Т. Ю.

Удосконалення технології управління місцевою
роботою дільниці в умовах невизначеності на
основі робастної оптимізації

..... 3

КАЛІЮТА Ю. В., АНАНЬЄВА О. М.

Аналітичний огляд систем залізничної автоматики

..... 13

АНАНЬЄВА О. М., БАБАЄВ М. М., ДАВИДЕНКО
М. Г., ПАНЧЕНКО В. В.

Синтез пристрою оцінювання параметрів
синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з
одиначною імпульсною завадою

..... 25

ТАРАСОВ К. О.

Удосконалення чинної системи оперативного
управління швидкісними залізничними
пасажирськими перевезеннями

.....33

| | |
|---|----|
| <p> OLES HAIDENKO, HALYNA HOLUB, IVAN KUIBOVSKYI A hierarchical model of the information environment for railway power supply system critical objects control 41 </p> | 41 |
| <p> КРАШЕНІНІН О. С., ШАПАТІНА О. О., КОВАЛЬОВ А. О., ЗАПАРА Я. В., КОВАЛЬОВА О. В. Оцінювання перспектив упровадження альтернативних технологій перевезень вантажів 50 </p> | 50 |
| <p> OLESIA BARKOVSKA, ANTON HAVRASHENKO. Research of the impact of noise reduction methods on the quality of audio signal recovery 57 </p> | 57 |
| <p> VLADYSLAV KHOLIEV Conceptual model of the technology for calculating the similarity threshold of two audio sequences 66 </p> | 66 |
| <p> KOMAR O.M., LYSECHKO V.P., TARSHIN V.A., MISIURA O.M., BEZVERKHYYI S.A. Complex signals parameters optimization on the base of linear approximations using the gradient method and newton’s method 74 </p> | 74 |

УДК 656.2

DOI: 10.18664/ikszt.v29i3.313594

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н.,

ПРОХОРОВ В. М., к.т.н.,

КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к.т.н.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації

У статті розглянуто удосконалення технології управління місцевою роботою залізничних дільниць в умовах невизначеності, що важливо для підвищення ефективності вантажних перевезень. Сучасні методи планування часто базовані на середньодобових даних і не враховують коливань, отже, ефективність управління місцевою роботою може суттєво знижуватися через недостатнє врахування динаміки перевезень. Метою статті є розроблення нової методики планування роботи збірних поїздів з урахуванням невизначеностей, що дасть змогу підвищити точність і надійність планування. Для цього пропонують використовувати робастну оптимізацію, яка забезпечує стійкість рішень до змінюваних умов шляхом застосування принципу мінімаксу. Цей підхід дає змогу створювати надійні плани, які ефективно функціонують навіть у разі значних відхилень від очікуваних умов.

У статті проаналізовано результати моделювання, що було проведено за допомогою розробленої процедури оптимізації з застосуванням математичного апарата генетичних алгоритмів, реалізовану в середовищі MATLAB. Моделювання підтвердило ефективність запропонованого підходу.

Водночас результати дослідження показують, що для досягнення ще більших результатів доцільно враховувати статистичні дані про коливання обсягів місцевої роботи на станціях. Для цього пропонують інтегрувати стохастичну складову в модель робастної оптимізації, яка дає змогу краще враховувати варіації в обсягах перевезень і забезпечує більш точні рішення. Це може суттєво покращити ефективність планування, зменшити витрати і підвищити загальну ефективність управління залізничними перевезеннями.

Отже, запропоновані методи відкривають нові можливості для вдосконалення технологій управління місцевою роботою на залізниці, забезпечуючи більш надійні та економічні рішення в умовах невизначеності.

Ключові слова: місцева робота, невизначеність, планування роботи збірних поїздів, робастна оптимізація.

Постановка проблеми

Місцева робота на залізничних дільницях здійснюється за допомогою так званих збірних поїздів, які виконують операції з місцевими вагонами. Планування роботи збірних поїздів зазвичай базовано на передбачуваних, постійних об'ємах навантаження і вивантаження вагонів на дільниці. Проте в реальних умовах ці об'єми можуть суттєво коливатися в межах певних допустимих значень, і можливі комбінації цих змінних – надзвичайно різноманітні.

Такі коливання можуть призвести до того, що попередньо прийнятий план роботи збірних поїздів виявиться неефективним. Традиційні методи планування, що не враховують цю невизначеність, можуть призвести до нерационального використання ресурсів, затримок у перевезеннях, додаткових витрат вагоногодина, несвоєчасного доставлення порожніх вагонів до місць навантаження і, як наслідок, підвищення експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стаття [1] досліджує планування вантажних перевезень на залізниці в умовах змішаної невизначеності, поєднуючи нечіткість і випадковість. Інноваційний аспект полягає в розробленні трьох моделей програмування з шансом, які враховують ці два види невизначеності для оптимізації маршрутів, обсягів вантажів і частоти перевезень. Математичний апарат включає міру шансу та критичні значення нечітко-випадкових змінних, а для розв'язання моделей застосовують гібридний алгоритм, що поєднує пошук потенційних маршрутів, симуляцію та генетичний алгоритм.

Стаття [2] розглядає проектування логістичного ланцюга холодного залізничного транспорту, використовуючи змішане цілочисельно-нелінійне програмування (MINLP) для оптимізації хабів, вантажних потоків і частоти обслуговування.

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

Невизначеності враховують через нечітке програмування. Результати показують до 1,99 % економії витрат при збільшенні хабів і до 2,69 % зниження витрат для економічно орієнтованих рішень порівняно з детермінованим підходом. Основний недолік – складність обробки нечітких даних.

Стаття [3] розглядає тактичне планування операцій, яке включає ухвалення ряду взаємопов'язаних рішень для оптимального розподілу ресурсів і досягнення економічних і сервісних цілей компанії. Основну увагу приділяють проектуванню мережі обслуговування для міжміських вантажних перевізників, таких як залізниці та автоперевізники. Введено нову класифікацію проблем проектування мережі обслуговування та формулювання моделей. Новизна полягає в поданні нової класифікації проблем і розвитку математичного програмування для проектування мереж. Основний недолік – складність розв'язання моделей, особливо для складних випадків. Недоліком є й висока обчислювальна складність підходу та можливі проблеми з ефективністю за екстремальних варіацій невизначеності.

Стаття [4] розглядає транспортну задачу з чотирма вимірами для сумісних і несумісних варіантів плану, де параметри подано у вигляді нечітких змінних другого типу. Запропонована модель орієнтована на мінімізацію транспортних витрат при врахуванні доступності, попиту, ваги та обсягу транспортних засобів. Нечіткі параметри типу 2 спочатку перетворюються в нечіткі параметри типу 1, а потім у випадкові параметри за допомогою методів узагальненої достовірності та центроїда. Ці параметри конвертовані в чіткі параметри для обмежень і цільової функції.

Новизна полягає в детальному описі процедур перетворення нечітких параметрів типу 2 у чіткі та застосуванні кількох методів для цього перетворення. Основний недолік – обчислювальна складність процесу перетворення і розв'язання моделі.

Стаття [5] пропонує метод урахування мінливості параметрів, які є вихідними даними для розрахунку плану формування одноступінних вантажних поїздів для підвищення його надійності. Впроваджено використання нечітких множин для врахування коливань у параметрах організації вагонопотоків. Розроблено метод визначення оптимального порогового значення руху вагонів в умовах невизначеності за допомогою технік Беллмана і Заде.

Новизна полягає в застосуванні нечітких множин для підвищення стабільності плану формування поїздів і зменшення кількості корегувань. Основний недолік – можлива складність реалізації методів нечітких множин і їхня обчислювальна складність.

Стаття [6] пропонує нову модель формування вантажних поїздів на залізничному транспорті з урахуванням нечітких витрат на перевезення. Модель використовує метод нечітких найкоротших шляхів для визначення оптимальних маршрутів, а потім

перетворює нечітку модель у класичну модель блокування. Для вирішення великих реальних проблем розроблено метод на основі генетичних алгоритмів.

Новизна полягає у використанні нечітких витрат для моделювання блокування вагонів і застосуванні генетичних алгоритмів для покращення ефективності розв'язання. Основний недолік – можливі обчислювальні витрати при застосуванні генетичних алгоритмів на великих задачах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що передові математичні методи, як, наприклад, техніки нечіткої оптимізації, переважно застосовують до більш загальних проблем, зокрема охоплюючи галузі логістики та змішаних перевезень, залишаючи питання удосконалення управлінських технологій на рівні місцевої роботи недостатньо розробленими.

Попри значні досягнення в оптимізації технологій залізничного транспорту, питання удосконалення технологій управління місцевою роботою на залізничних дільницях часто залишаються поза увагою. Більшість досліджень у цій сфері зосереджені на загальних методах оптимізації, не враховуючи специфіку і складність проблем місцевої роботи залізничного транспорту.

Це підкреслює важливість подальшого вивчення і адаптації сучасних підходів, зокрема підходів до оперування факторами невизначеності, для підвищення ефективності підсистеми місцевої роботи, що є критично важливим для зниження витрат і підвищення загальної ефективності транспортних систем.

Формулювання цілей

Метою цього дослідження є розроблення підходу до планування роботи збірних поїздів, що дасть змогу враховувати коливання обсягів навантаження та вивантаження вагонів на дільниці і обирати такий варіант плану, який буде найбільш раціональним і надійним за будь-яким варіантом розвитку подій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасна організація місцевої роботи на залізничних ділянках стикається з багатьма викликами, пов'язаними з регламентацією та плануванням. Незважаючи на наявність великої кількості нормативно-технологічних документів, таких як план формування поїздів, графік руху місцевих поїздів і оперативне планування поїзної та вантажної діяльності, їхня невідповідність між собою створює значні труднощі в управлінні місцевими вагонопотоками. Ці документи розробляють підрозділи на різні часові горизонти, що призводить

до фрагментації планування та зниження ефективності експлуатаційних процесів.

Реальна ситуація на місцях часто суттєво відрізняється від передбаченої в нормативних актах, де припускають рівномірне середньодобове навантаження. У результаті виникає нерівномірність у роботі, яка проявляється у тривалих перервах між подаванням вагонів на вантажні fronti і їхнім посиленням надходженням на станції вивантаження. Це у свою чергу призводить до зниження ефективності використання навантажувально-розвантажувальних можливостей і збільшення операційних витрат.

Нерівномірність у виконанні вантажних операцій протягом доби є об'єктивною реальністю, яку необхідно враховувати при плануванні місцевої роботи. Проте наявні методи змінно-добового планування не орієнтовані на досягнення максимальних результатів щодо завантаження та розвантаження, що призводить до частих корегувань планів і зниження стійкості роботи всієї системи.

Складність організації місцевої роботи полягає в розпорошеності вантажних операцій на великій кількості станцій, більшість із яких через низьку рентабельність є збитковими. Ефективне управління місцевою роботою потребує більш гнучкого та узгодженого підходу – не лише середньодобові норми, але й реальна динаміка руху вагонів. Планування має бути спрямоване на максимальне використання вантажних фронтів, що можливе лише за умови своєчасного подавання вагонів на станції призначення.

Отже, необхідність розроблення більш стійких і адаптивних методів планування та управління місцевою роботою, здатних враховувати мінливість і невизначеність умов, стає очевидною.

Розглянемо залізничну дільницю, обмежену дільничними станціями А та F, які обслуговують місцеву роботу на проміжних станціях В, С, D і E (рис. 1).

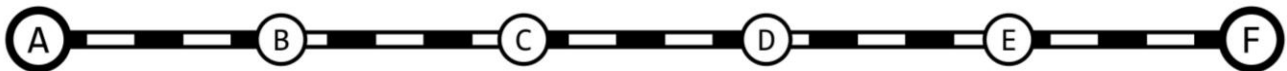


Рис. 1. Схема залізничної дільниці місцевої роботи

Обслуговування місцевої роботи цих станцій здійснюється за допомогою збірних поїздів. У сучасних умовах на станціях мережі АТ «Укрзалізниця» мають місце істотні добові коливання обсягів навантаження і вивантаження на станціях, пов'язаних як із неритмічністю роботи підприємств, так і неефективною організацією місцевої роботи на залізниці. У будь-якому разі такі коливання є неминучими, якщо економіка є не плановою, а ринковою. З іншого боку, система організації місцевої роботи на основі збірних поїздів передбачає, що вибрана схема обслуговування станцій дільниці прив'язана до ниток графіка руху, який на мережі АТ «Укрзалізниця» діє без змін тривалий час і фактично для вантажних поїздів діє протягом усього календарного року. Існують і інші засоби і технології для обслуговування місцевої роботи проміжних станцій не тільки за кордоном, але й на мережі АТ «Укрзалізниця». Однак на Укрзалізниці вони фактично є допоміжними і лише доповнюють технологію, базовану на збірних поїздах. Отже, актуальним завданням є формування методів більш раціонального планування роботи збірних поїздів в умовах коливань обсягів місцевої роботи, тобто в умовах невизначеності. Стандартним підходом у такому випадку скоріше за все є побудова імовірнісних або статистичних моделей на основі історичних даних по кожній станції. Однак він дуже витратний і непродуктивний, адже ці імовірнісні характеристики постійно змінюються. До того ж моделі дискретної оптимізації, які містять значну

кількість стохастичних змінних, дуже важко оптимізувати. Тож у такому випадку доцільно використовувати простіші моделі, наприклад інтервальні числа, які визначають лише верхню і нижню межі змінної, – для побудови надійного плану роботи збірних поїздів застосувати підхід на основі робастної оптимізації.

Робастна оптимізація – це метод, спрямований на пошук рішень, стійких до змін і невизначеностей у вхідних даних [7]. Замість того, щоб шукати оптимальні рішення для фіксованих умов, робастна оптимізація прагне знайти такі рішення, які будуть ефективними навіть при відхиленнях від очікуваних параметрів. У випадку планування роботи збірних поїздів цей метод дає змогу створити план, який залишається надійним за змінних обсягів вантажоперевезень, затримок на станціях та інших невизначеностей. Робастна оптимізація забезпечує збалансованість між ефективністю і надійністю, мінімізуючи потребу в частих корегуваннях плану, що врешті-решт знижує експлуатаційні витрати та підвищує стабільність роботи залізничної системи.

Отже, необхідно сформувати цільову функцію моделі управління, яка реалізує підхід робастної оптимізації. За критерій оптимізації доцільно взяти витрати вагоногодин. Тоді цільова функція може бути записана як

$$\begin{aligned}
 & B(x, \mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вив}, \mathbf{m}_{пар}^{вив}, \tau_x^{пр.зб}, \tau_{-x}^{пр.зб}, \tau_x^{від.зб}, \tau_{-x}^{від.зб}, \tau_x^{ман}, \tau_{-x}^{ман}) = \\
 & \min_x \left\{ \max_{(\mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вив}, \mathbf{m}_{пар}^{вив})} \left\{ \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест}) (\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб}) + \right. \right. \\
 & \quad + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}) (24 - (\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,-x}^{від.зб})) + \\
 & \quad + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}) \tau_{i,x}^{ман} + \\
 & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,-x}^{вив} + m_{i,-x}^{*нест}) \tau_{i,-x}^{ман} \right\} \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

де \mathcal{X} – булева керуюча змінна, яка відповідає одній із двох схем прокладання пари збірних поїздів, кожену зі схем будемо ідентифікувати за напрямком першого збірного поїзда, отже, цю булеву змінну можна інтерпретувати так: 0 – парний напрям (і відповідна схема), 1 – непарний напрям;

$\mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вив}, \mathbf{m}_{пар}^{вив}$ – змінні вектори (на що й вказує жирний шрифт), які містять поточні значення параметрів місцевої роботи, подані як інтервальні числа, – обсяги навантаження в непарному і парному напрямку і обсяги вивантаження в непарному і парному напрямку по станціях місцевої роботи відповідно, ваг;

$m_{i,x}^{нав}$ – елемент змінного вектора, що відповідає кількості вагонів, навантажених на i -й станції і відправлених у напрямку \mathcal{X} (на відповідну дільничну станцію) або зворотному напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$;

$m_{i,x}^{вив}$ – елемент змінного вектора, що відповідає кількості вагонів, які прибули до i -ї станції з напрямку \mathcal{X} (відповідної дільничної станції) або у зворотному напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$;

$m_{i,x}^{*нест}, m_{i,x}^{*надл}$ – кількість порожніх вагонів, які прибудуть до i -ї станції з напрямку \mathcal{X} (або зворотного напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$) із метою компенсації нестачі порожніх вагонів, які відправляються з i -ї станції в напрямку \mathcal{X} (або зі зворотного напрямку, якщо другий індекс – $-\mathcal{X}$) із метою усунення надлишку на станції, ці змінні позначені зірочкою, тому що вони залежать від змінних моделі, але ця залежність є складною, адже змінні є результатом оптимізації вкладеної оптимізаційної моделі, наприклад лінійного програмування за типом транспортної задачі, мета

якої раціонально розподілити порожні вагони по дільниці;

$(\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,-x}^{від.зб})$ – тривалість часового інтервалу між прибуттям першого збірного поїзда до i -ї станції і відправленням другого;

$(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб})$ – тривалість часового інтервалу між відправленням першого збірного поїзда з i -ї станції і прибуттям другого;

$\tau_{i,x}^{ман}, \tau_{i,-x}^{ман}$ – тривалість маневрових операцій на i -й станції з першим і другим збірними поїздами відповідно;

n – кількість станцій місцевої роботи (проміжних станцій) на дільниці. Перший доданок цільової функції є сумарними витратами вагоногодин у часових інтервалах між відправленням першого збірного поїзда та прибуттям другого по кожній із проміжних станцій. Другий доданок є сумарними витратами вагоногодин у часових інтервалах між відправленням другого збірного поїзда та прибуттям першого по кожній із проміжних станцій. Третій і четвертий доданки є сумарними витратами вагоногодин під час виконання операцій із першим і другим збірними поїздами відповідно по кожній із проміжних станцій.

Оператори \min і \max у цільовій функції застосовані з метою реалізації принципу мінімаксу – знайти таке рішення, яке мінімізує максимально можливий негативний вплив невизначеності на цільову функцію. Це означає, що замість того, щоб оптимізувати цільову функцію лише для одного можливого сценарію, розглядають усі можливі сценарії, що можуть виникнути внаслідок невизначеності параметрів, тобто знайти рішення, яке є «найкращим серед найгірших» — мінімізувати витрати в найгіршому випадку.

Застосовуючи принцип мінімаксу до задачі побудови надійного плану роботи збірних поїздів, ми прагнемо мінімізувати максимальні можливі збитки або витрати, які можуть виникнути через коливання в параметрах, таких як обсяги перевезень. У звичайній оптимізації ми могли б шукати рішення, яке мінімізує середнє значення витрат або часу. Проте в умовах невизначеності, де параметри можуть варіюватися, мінімакський підхід дає нам змогу знайти таке рішення, яке залишиться оптимальним навіть за найгіршого сценарію.

Крім того, на змінні моделі, як керуючі, так і допоміжні, необхідно накласти обмеження, які мають забезпечити дотримання певних технічних і/або технологічних умов.

Хоча для кожного змінного параметра, як, наприклад, обсяги навантаження по станціях, задано індивідуальні межі коливань, однак межі коливань також можуть бути задані і для агрегованих величин, як, наприклад, сумарне навантаження в непарному напрямку тощо. Такі обмеження для моделі можна записати як

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{нав.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.пар} \leq m_{нав.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{нав.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.неп} \leq m_{нав.неп}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.пар} \leq m_{вив.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.неп} \leq m_{вив.неп}^{\Sigma \max} \end{array} \right. \quad (2)$$

де $T_i^{ван.оп.}$ – мінімальна тривалість здійснення вантажних операцій (у тому числі подвійних, якщо до станції надходять навантажені вагони) на i -й станції. Крім того, необхідно забезпечити виконання технологічного обмеження щодо максимальної кількості вагонів у складі збірних поїздів, адже

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=y}^{N-2} m_{i,d}^{вив} + \sum_{i=2}^y m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{нор} (p \leq y)(q > y) \leq m^{норм}, \quad \forall y = 1 \dots N-1, d = 1 \\ \sum_{i=3}^y m_{i-2,d}^{вив} + \sum_{i=y}^{N-1} m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{нор} (p \geq y)(q < y) \leq m^{норм}, \quad \forall y = 2 \dots N, d = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

де $m_i^{нав.пар}, m_i^{нав.неп}, m_i^{вив.пар}, m_i^{вив.неп}$ – поточні значення навантаження і вивантаження в парному і непарному напрямках по i -й станції відповідно;

$m_{нав.пар}^{\Sigma \min}, m_{нав.неп}^{\Sigma \min}, m_{вив.пар}^{\Sigma \min}, m_{вив.неп}^{\Sigma \min}, m_{нав.пар}^{\Sigma \max}, m_{нав.неп}^{\Sigma \max}, m_{вив.пар}^{\Sigma \max}, m_{вив.неп}^{\Sigma \max}$ – максимальні і мінімальні сумарні значення навантаження і вивантаження в парному і непарному напрямках відповідно.

Крім того, на проміжній станції, що є найближчою до дільничної станції, на якій сходяться збірні поїзди, необхідно забезпечити можливість виконання подвійних вантажних операцій із вагонами в інтервалі між збірними поїздами, які прибули до станції з першим збірним поїздом у завантаженому (деякі в порожньому) стані і з якими необхідно провести операції розвантаження (якщо потрібно), а потім повторного навантаження до прибуття другого збірного поїзда, до якого вони будуть причеплені

$$\left(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб} \right) \geq T_i^{ван.оп.}, \quad i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = 0 \\ n, & \text{якщо } x = 1 \end{cases} \quad (3)$$

кількість вагонів у складі поїзда, з якими він вирушає на кожен перегін, змінюється і залежить від значень керуючих змінних. Ці обмеження в рамках моделі (окремо для непарного і парного напрямків) можна записати як

де N – кількість станцій на дільниці включно з дільничними станціями;

U – параметр, що набуває значення номерів станцій на дільниці (усі станції пронумеровані послідовно включно з дільничними станціями), тобто він перебирає номери станцій, із яких збірні поїзди відправляються на перегони (для обчислення кількості вагонів у складі поїзда, з якими він вирушає на перегін);

d – напрямок руху по дільниці: 0 – парний, 1 – непарний;

m^{norm} – нормативна кількість вагонів у складі збірного поїзда, прийнята на певній дільниці;

$m_{p,q}^{por}$ – кількість порожніх вагонів, передана зі станції P до станції Q в порядку регулювальних заходів згідно з поточним планом переміщення порожніх вагонів (який слід перераховувати окремо як вкладену підзадачу при кожній зміні значень змінних моделі).

Розглянемо дільницю, наведену на рис. 1. Припустимо, що обсяги навантаження і вивантаження вагонів по станціях місцевої роботи коливаються в певних межах і тому задані інтервальними числами (табл. 1). У передостанньому та останньому стовпчиках наведені мінімальні і максимальні значення для сумарних величин цих параметрів.

Таблиця 1

Обсяги місцевої роботи на станціях дільниці

| проміжні станції | B | C | D | E | $m^{\Sigma min}$ | $m^{\Sigma max}$ |
|-----------------------------------|---------|---------|-------|---------|------------------|------------------|
| навантаження в парному напрямку | [0;5] | [0;5] | [0;5] | [0;5] | 10 | 17 |
| навантаження в непарному напрямку | [13;18] | [4;9] | [0;5] | [15;20] | 30 | 47 |
| вивантаження в парному напрямку | [0;5] | [0;5] | [1;6] | [1;6] | 11 | 19 |
| вивантаження в непарному напрямку | [0;5] | [13;18] | [4;9] | [1;6] | 25 | 35 |

Прийmemo також, що величина мінімальної тривалості здійснення вантажних операцій $T_i^{ван.оп.}$

для всіх станцій дорівнюватиме 5 год, а нормативна кількість вагонів у складі збірного поїзда на дільниці прийнята на рівні 50 ваг.

Тоді для оптимізації сформованої моделі (1) із використанням вихідних даних із табл. 1 необхідно розробити оптимізаційну процедуру, адже навіть сучасні оптимізаційні пакети, або навіть середовища

для математичних розрахунків, такі як Matlab, не містять готових рішень для задач робастної оптимізації, особливо якщо ті мають дискретну природу, як задача оптимізації роботи збірних поїздів. Ураховуючи складність задачі, як механізм оптимізації доцільно взяти математичний апарат генетичних алгоритмів [8].

Розроблення процедури оптимізації на основі генетичних алгоритмів у середовищі MATLAB для задачі дискретної природи є складним, але ефективним підходом до пошуку оптимальних рішень. Генетичні алгоритми, які імітують процеси природного відбору і еволюції, дають змогу знаходити рішення для складних комбінаторних задач, де традиційні методи можуть бути менш ефективними. У середовищі MATLAB цей підхід реалізовано через розроблення спеціальних функцій, які визначають операції селекції, кросинговеру, мутації та оцінювання придатності. Дискретна природа задачі потребує розроблення спеціалізованих операторів, які забезпечують генерацію і модифікацію рішень у відповідності з допустимими значеннями змінних. У процесі еволюції популяція потенційних рішень поступово покращується шляхом відбору найбільш пристосованих індивідів, що дає змогу досягти глобально оптимального розв'язку навіть за наявності великого простору можливих варіантів.

Було розроблено спеціальну процедуру оптимізації на основі генетичних алгоритмів, яку реалізовано в середовищі MATLAB. Ця процедура забезпечує повне дослідження простору рішень і дотримання необхідних обмежень. Після розроблення алгоритму було проведено моделювання з використанням зазначених вище вихідних даних, спрямоване на оцінювання продуктивності процедури та адекватності розробленої моделі.

Фінальні значення обсягів місцевої роботи, отримані в результаті моделювання, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Обсяги місцевої роботи, отримані при моделюванні

| проміжні станції | B | C | D | E | Σ |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----------|
| навантаження в парному напрямку | 5 | 5 | 2 | 5 | 17 |
| навантаження в непарному напрямку | 18 | 4 | 5 | 20 | 47 |
| вивантаження в парному напрямку | 0 | 5 | 6 | 6 | 17 |
| вивантаження в непарному напрямку | 3 | 18 | 9 | 1 | 31 |
| разом навантаження | 23 | 9 | 7 | 25 | 64 |
| разом вивантаження | 3 | 23 | 15 | 7 | 48 |
| нестача порожніх вагонів | 20 | 0 | 0 | 18 | 38 |
| надлишок порожніх вагонів | 0 | 14 | 8 | 0 | 22 |

Також під час оптимізації вирішують підзадачу розподілу порожніх вагонів на дільниці. Для обсягів

місцевої роботи (табл. 2) цей розподіл виглядає так, як наведено на рис. 2.

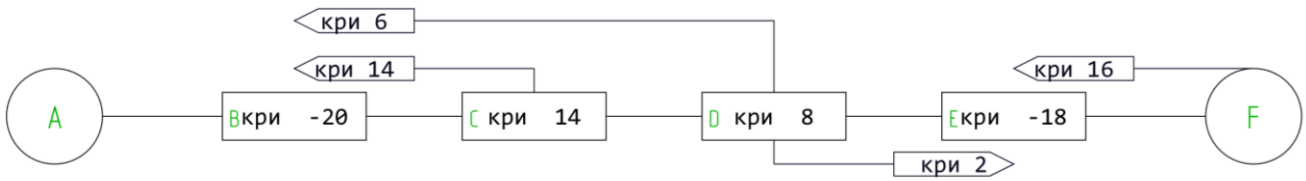


Рис. 2. Розподіл порожніх вагонів для забезпечення місцевої роботи на дільниці А-F, що відповідає оптимальному варіанту плану

На основі отриманого розподілу порожніх вагонів (рис. 2), а також даних про добове навантаження і вивантаження місцевих вагонів на

дільниці А-F (табл. 2) було розраховано діаграму балансу причеплених і відчеплених вагонів (рис. 3).

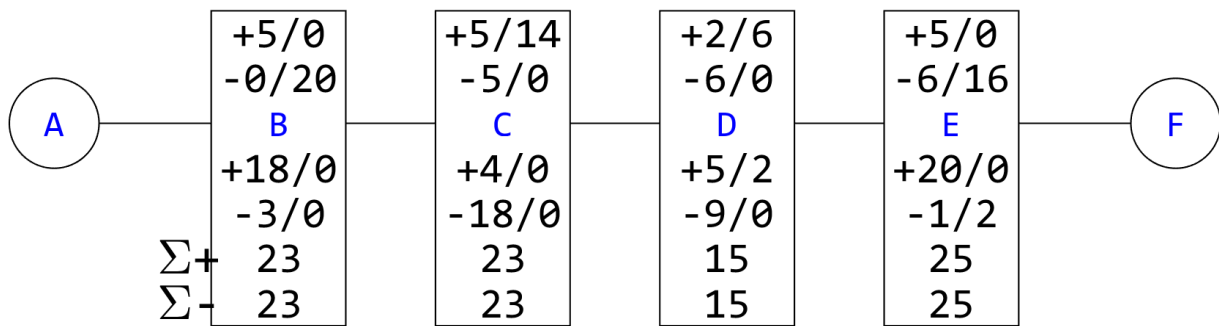


Рис. 3. Діаграма балансу причеплених і відчеплених місцевих вагонів на дільниці А-F

На основі отриманих діаграм було сформовано діаграму місцевих вагонопотоків на дільниці А-F (рис. 4).

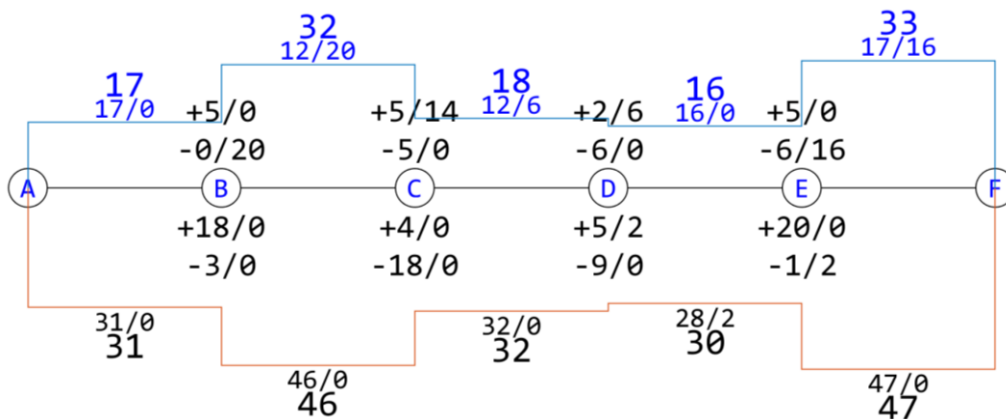


Рис. 4. Діаграма місцевих вагонопотоків на дільниці А-F

Для простоти і наочності запропонованого підходу було вибрано дані, які передбачають одну пару збірних поїздів, а також не розглядали перехресні схеми та ін. Однак слід розуміти, що реальні задачі планування місцевої роботи можуть бути набагато складнішими.

На основі прийнятої кількості збірних поїздів і діаграми місцевих вагонопотоків було створено план-наряд для практичної реалізації руху збірних поїздів по залізничній дільниці (рис. 5) – схему переміщення поїздів і їхніх зупинок на проміжних станціях для проведення маневрових операцій із причеплення та

відчеплення вагонів. Крім того, у плані-наряді станцій відображено час, витрачений на зупинки на кожній зі

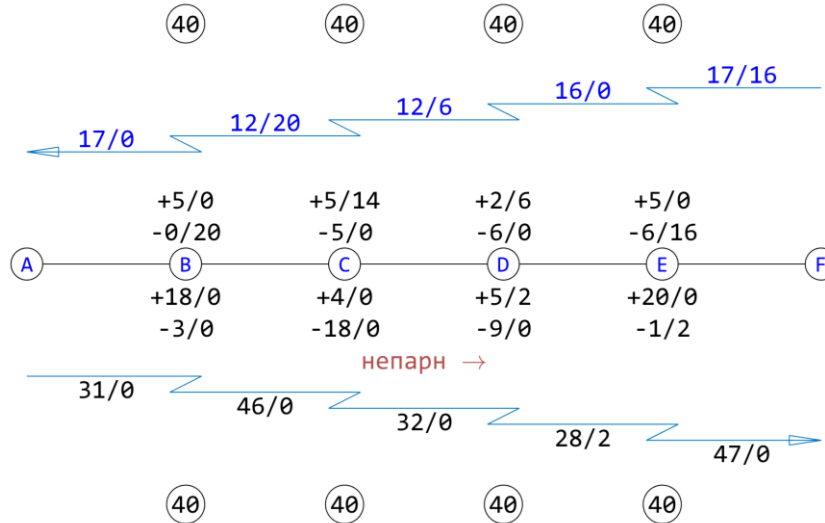


Рис. 5. План-наряд на роботу збірних поїздів

У випадку, якщо відбуваються операції відчеплення і причеплення місцевих вагонів, встановлено тривалість зупинок на рівні 40 хв. Натомість, у тих випадках, коли виконують лише один вид операцій, передбачені зупинки тривалістю 25 хв. Цей підхід сприяє ефективній координації часу для виконання маневрових операцій і забезпечує безперервний рух збірних поїздів по дільниці.

Також у результаті оптимізації на основі сформованого плану-наряду та даних про тривалість руху вантажних поїздів по перегонах дільниці А-Ф (рис. 6) було отримано робастний варіант плану організації роботи збірних поїздів на графіку руху, який відповідає схемі «перший парний поїзд» (рис. 6).

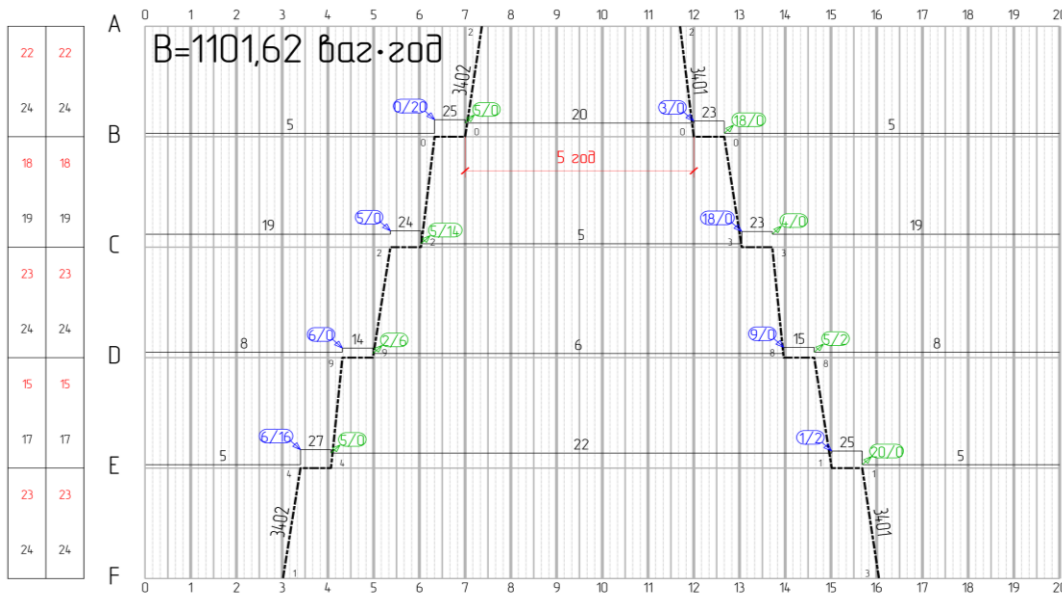


Рис. 6. План роботи збірних поїздів на дільниці А-Ф за схемою «перший парний поїзд»

Витрати вагоно-годин, що відповідають отриманому плану за схемою «перший парний поїзд», становили величину 1101,62. Слід зазначити, що витрати вагоно-годин для такого знайденого найскладнішого випадку комбінації вихідних даних за схемою «перший непарний поїзд», становлять лише

на декілька десятків вагоно-годин більше, ніж за схемою «перший парний поїзд». Крім того, розроблена оптимізаційна процедура була створена так, що вона могла відслідковувати певні екстремальні випадки, у яких вартість неоптимального саме для поточної комбінації даних

рішення була надто високою. Отже, були виявлені такі комбінації даних, різниця витрат вагоно-годин для яких залежно від вибраної схеми прокладання збірних поїздів могла становити навіть п'ятикратну величину. У більшості таких випадків саме отримана за допомогою оптимізаційної процедури схема виявлялась оптимальною.

Отже, отримані результати показали надійність і ефективність запропонованого підходу, надавши цінні дані для визначення оптимального рішення задачі.

Висновки

Було розглянуто проблему удосконалення технології управління місцевою роботою на залізничних дільницях за умов невизначеності. Запропонований підхід базований на застосуванні робастної оптимізації, що дає змогу забезпечити стійкість і надійність рішень за мінливих і непередбачуваних умов. У результаті проведених досліджень було розроблено процедуру оптимізації на основі використання математичного апарата генетичного алгоритму, за допомогою якої ефективно знаходять оптимальні плани роботи для збірних поїздів. Моделювання показало, що запропонований метод зменшує кількість корегувань планів під час їх реалізації, що сприяє підвищенню ефективності та зменшенню експлуатаційних витрат. Використання робастної оптимізації у процесі планування місцевої роботи забезпечує більш точне і адаптивне управління, що враховує реальні умови роботи на залізничних ділянках і дає змогу досягти оптимального результату навіть за умов значної невизначеності.

Розроблений метод оптимізації плану роботи збірних поїздів на основі робастної оптимізації враховує мінливий характер параметрів місцевої роботи, що дає змогу значно підвищити стійкість прийнятих рішень, зменшити кількість корегувань плану та знизити експлуатаційні витрати. Розроблені підходи є ефективним інструментом для покращення планування місцевої роботи на залізницях. Однак за наявності статистичних даних про коливання обсягів місцевої роботи на станціях для знаходження більш точного рішення доцільно ускладнити модель і застосувати підхід, наприклад, стохастичної робастної оптимізації, адже з погляду математики така задача фактично є задачею пошуку стратегії, яка багаторазово буде застосована до різних комбінацій даних.

Список використаних джерел

1. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*. 2011. 11(1). P. 778–792.
2. Gan M., Li D., Yao Z., Yu H., Ou Q. Intelligent decision modeling for optimizing railway cold chain service networks under uncertainty. *Information Sciences*. 2024. 679. C. 121112.
3. Crainic T. G. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*. 2000. 122. 2. P. 272–288.
4. Aktar M. S., Kar C., Dutta P. Fixed charge 4-dimensional transportation problem for breakable incompatible items with type-2 fuzzy random parameters under volume constraint. *Advanced Engineering Informatics*. 2023. 58. 102222.
5. Badetskii A., Medved O. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. *Transportation Research Procedia*. 2021. 54. P. 559–567.
6. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M., Seyedabadi M., Khoshraftar M. M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. 39(20). P. 6114–6125.
7. Poss M. Robust combinatorial optimization with knapsack uncertainty. *Discrete Optimization*. 2018. 27. P. 88–102.
8. Marseguerra M., Zio E., Martorell S. Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. 91(9). P. 977–991.

Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu. Enhancing the Technology of Local Operations Management for Railway Sections under Uncertainty Based on Robust Optimization.

The paper explores the enhancement of local operations management technology for railway sections under uncertainty, which is crucial for improving the efficiency of freight transportation. Current planning methods often rely on average daily data and do not account for fluctuations. Consequently, the effectiveness of local operations management can be significantly reduced due to inadequate consideration of transportation dynamics.

The goal of the paper is to develop a new methodology for planning the operation of consolidated trains considering uncertainties, which will improve planning accuracy and reliability. To achieve this, robust optimization is proposed, which ensures solution stability against changing conditions through the application of the minimax principle. This approach allows for the creation of reliable plans that function effectively even in the face of significant deviations from expected conditions.

The paper analyzes the results of modeling conducted using a developed optimization procedure based on genetic algorithms, implemented in the MATLAB environment. The modeling confirmed the effectiveness of the proposed approach.

At the same time, the study results indicate that to achieve even greater outcomes, it is advisable to consider statistical data on fluctuations in local operations volumes

at stations. Therefore, it is suggested to integrate stochastic robust optimization, which better accounts for variations in transportation volumes and provides more accurate solutions. This could significantly enhance planning efficiency, reduce costs, and improve the overall effectiveness of railway transportation management.

Thus, the proposed methods open new opportunities for refining local operations management technologies on railways, providing more reliable and cost-effective solutions under uncertainty.

Keywords: local operations, uncertainty, planning of local train operations, robust optimization

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 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.

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.

Prokhorov Viktor, PhD (Tech), 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.

КАЛЮТА Ю. В., аспірант,
 АНАНЬЄВА О. М., д.т.н., професор
 (Український державний університет залізничного транспорту)

Аналітичний огляд систем залізничної автоматики

У статті розглянуто системи залізничної автоматики за їхньою елементною базою. Запропоновано ієрархічну структуру, засновану на методі аналізу ієрархій, для вибору типу системи для впровадження. Проведено узагальнений аналіз вибору доцільності впровадження систем. На основі аналізу визначено необхідні кроки розвитку систем залізничної автоматики, серед яких першочерговим напрямом визначено діагностування рейкових кіл. Подано деякі незначні пропозиції для вдосконалення систем.

Ключові слова: мікропроцесорні системи, мікропроцесорна диспетчерська централізація (МДЦ), підсистема технічного діагностування (ПСТД), рейкове коло, метод аналізу ієрархій.

Вступ

Розвиток залізничної автоматики (ЗА) призвів до створення різних типів систем за елементною базою. До таких типів належать релейні, електронно-релейні (наприклад системи диспетчерської централізації «Нева»), релейно-процесорні та мікропроцесорні системи. Через це різноманіття господарству сигналізації та зв'язку важко вибрати тип для впровадження, оскільки кожен із них має свої переваги та недоліки.

Тому актуальним завданням є проведення порівняльного аналізу різних типів за елементною базою вітчизняних систем із метою оцінювання доцільності їх впровадження та виявлення можливостей для вдосконалення.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналізуючи джерела інформації, у яких розглянуто мікропроцесорні системи залізничної автоматики, зокрема [1-15], можна виділити такі їхні переваги:

- 1) розширення функційних можливостей для господарства перевезень;
- 2) архівація стану пристроїв, поїзної ситуації та дій персоналу в «чорну скриньку»;
- 3) відносна простота змін при реконструкції колійного розвитку;
- 4) підвищення безвідмовності;
- 5) наявність технічного діагностування;
- 6) простота ув'язки з іншими пристроями та об'єктами вищого рівня;
- 7) значне зменшення кількості реле;
- 8) зменшення площі поста ЕЦ;
- 9) зменшення часу на обслуговування постових пристроїв;
- 10) зменшення витрат часу на оперативне виявлення і усунення пошкоджень;

11) зменшення обсягу монтажних робіт. У літературі зазвичай розглядають принципи побудови мікропроцесорних систем, проте не згадують про недоліки, які виникають при їх застосуванні. Тому слід описати недоліки мікропроцесорних систем:

- 1) необхідність доведення функційної безпечності та надійності;
- 2) значно технологічно складніша побудова пристроїв (використання закритих програмно-апаратних комплексів (ПАК));
- 3) менша завадостійкість пристроїв;
- 4) більша вартість впровадження мікропроцесорних пристроїв у розрахунку на один об'єкт керування та контролю;
- 5) можливість зависання та збоїв автоматизованих робочих місць (АРМ);
- 6) необхідність більш висококваліфікованого персоналу;
- 7) прив'язаність до виробника системи, а саме програмної та елементної баз;
- 8) необхідність витрат коштів на сервісне обслуговування сторонніми організаціями;
- 9) швидке моральне старіння електронних компонентів (через певний час деякі компоненти можуть перестати бути доступними на ринку);
- 10) неможливість створення безпомилкового програмного забезпечення;
- 11) високі вимоги до якості електроживлення;
- 12) підвищені вимоги до кліматичних чинників.

Порівняння систем

Будь-яка система ЗА виконує всі необхідні функції згідно з ПТЕ та іншими нормативними документами [17-20], тому вибір елементної бази для системи залізничної автоматики не є очевидним.

У зв'язку з різноманіттям наявних систем і складністю вибору необхідно провести докладний аналіз і порівняння. Порівняння слід провести для основних систем ЗА: електричної централізації (ЕЦ), автоблокування (АБ), автоматичної переїзної сигналізації (АПС) і гіркової автоматичної централізації (ГАЦ), при цьому не розділяючи їх. Як альтернативи слід використовувати такі типи систем:

1. Релейна система.
2. Релейно-процесорна система (РП система).
3. Мікропроцесорна система (МП система).
4. Релейна система з мікропроцесорною диспетчерською централізацією (МДЦ).

У цьому випадку слід використовувати метод аналізу ієрархій (МАІ) [27], оскільки він дає змогу врахувати багатофакторні критерії вибору за відсутності об'єктивних даних і має ряд переваг, описаних у роботі [28].

Використання такої альтернативи, як релейна система з МДЦ, є обов'язковим, оскільки впровадження МДЦ охоплює ряд переваг, які є в мікропроцесорних системах ЕЦ, АБ та АПС: збільшення функційних можливостей для

господарства перевезень, наявність архівації та технічного діагностування, оперативне виявлення й усунення пошкоджень. МДЦ потрібно враховувати як складову основних систем і не враховувати її високий рівень (окрім розширення можливостей для господарства перевезень).

Ієрархічна структура вибору системи залізничної автоматики зображена на рис. 1 (з розрахованими ваговими критеріями, матриці парних порівнянь не наведені).

Критерій «безвідмовність і готовність» впливає на безпечність, тому він розділений і додатково включений до парних порівнянь за критерієм «безпечність». При відмовах рух поїздів не припиняється [17, 20], і «черговий по станції повинен приймати та відправляти поїзди і проводити маневрові переміщення, забезпечуючи перевірку вільності колії, стрілок і готування маршруту порядком, передбаченим для таких випадків у технічно-розпорядчому акті станції» [20]. При цьому виконання людиною таких вимог не гарантовано, на відміну від системи залізничної автоматики, тому безвідмовність за захисним станом має вплив на безпеку через «людський фактор».

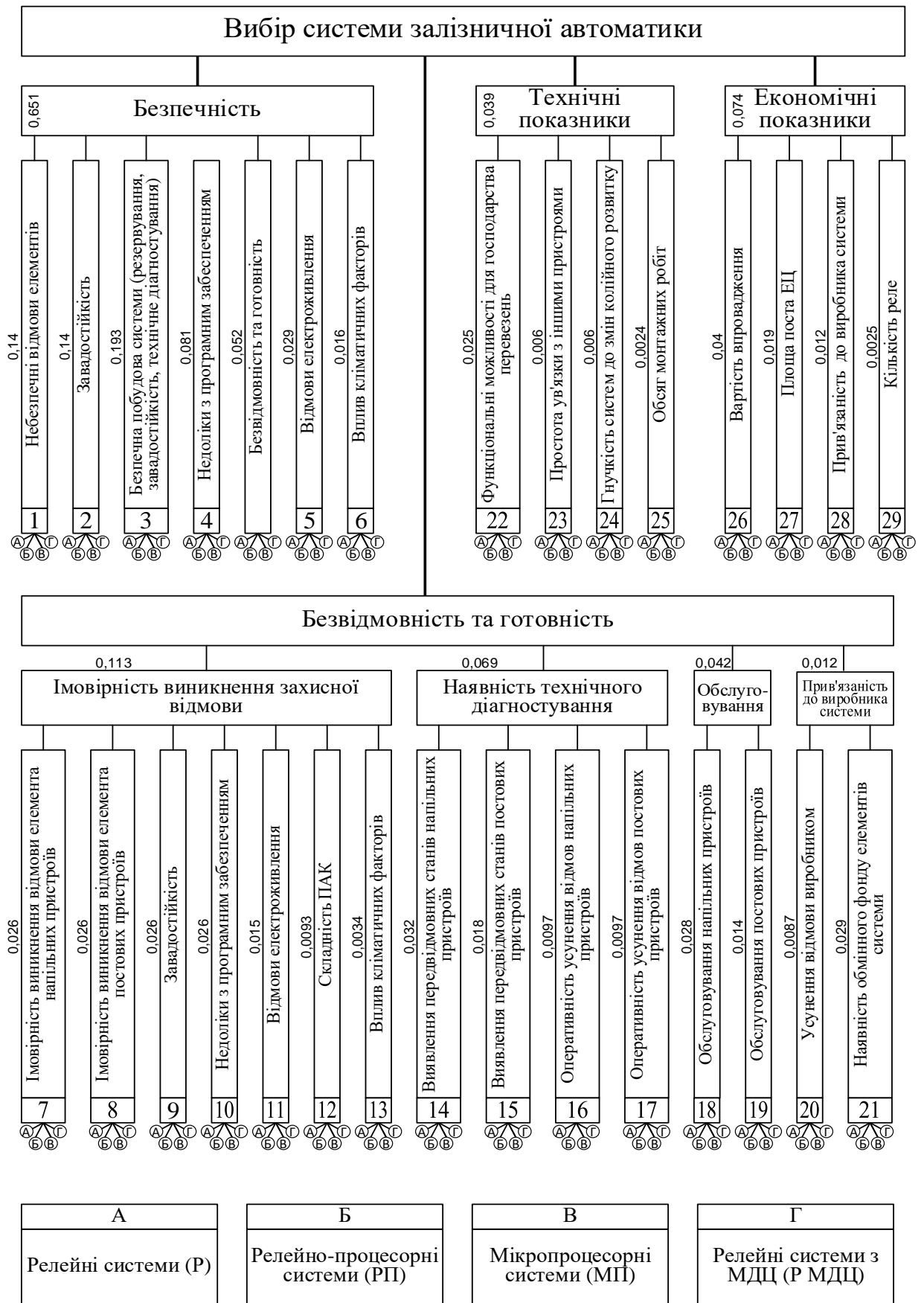


Рис. 1. Ієрархічна структура вибору системи залізничної автоматики

Аналіз альтернатив за критеріями

Використання мікроелектронної елементної бази створює проблеми їхньої надійності, оскільки імовірність небезпечної відмови є набагато більшою, ніж нерозмикання фронтового і загального контакту реле першого класу надійності (наприклад пробій транзистора, хибна генерація логічних «1» або «0», параметричні зміни; а для червоного вогню обрив транзистора чи іншого елемента може призвести до небезпечної відмови). Не меншою проблемою є низька завадостійкість таких елементів, зумовлена факторами, описаними в роботі [16, с. 188-190]. При цьому вплив завад (особливо високоенергетичних) може не лише спричинити раптову відмову, а й значно підвищити старіння та імовірність появи небезпечних відмов елементів. Тому з погляду критеріїв 1 і 2 системи з релейною елементною базою мають очевидну перевагу.

Використання програмного забезпечення (ПЗ) може становити небезпеку через його можливу недосконалість. Через це, за вимогами стандарту ДСТУ EN 50128:2022 [25], передбачено використання різних програмних засобів для кожного каналу резервування. У релейних, релейно-процесорних системах і мікропроцесорній диспетчерській централізації ПЗ відсутнє або практично не використано в частині забезпечення безпеки, за винятком відповідальних команд, що є їхньою перевагою за критерієм 4.

Електроживлення може становити небезпеку за відсутності напруги, що може призвести до потенційних аварійних ситуацій, наприклад відсутність горіння червоного вогню світлофора (коли ввімкнено заборонне показання) або неопускання шлагбаумів. Оскільки вимоги до електроживлення в системах на базі мікроелектроніки є більш суворими, релейні системи мають невелику перевагу за критерієм 5.

Використання мікропроцесорної техніки передбачає нагрівання до відносно високих температур. Якщо не дотримуватися кліматичних вимог, це може призвести до перегріву електронних компонентів, їх загоряння та подальшого замикання провідних доріжок, що може стати причиною небезпечної відмови. У релейних системах імовірність таких подій менша, що надає їм перевагу за критерієм 6.

Для забезпечення необхідного рівня функційної безпеки (ФБ) у мікропроцесорних системах відповідно до вимог робіт [22-26] використовують особливу побудову їхнього програмно-апаратного комплексу. На відміну від релейних систем, де використана безпечна побудова за одноканальною структурою, у МП системах необхідне використання резервування, елементів завадостійкості та підсистем діагностування для виявлення передвідмовних і відмовних небезпечних

станів. Це дає змогу досягнути необхідного рівня ФБ. Детально про принципи побудови безпечних систем описано в роботі [16]. Небезпеку відсутності живлення частково подолано схемними рішеннями як у релейних, так і МП системах, наприклад застосування перенесення червоного вогню, білого вогню на дорожньому переїзному світлофорі, застосування шлагбаумів, які закриваються під власною вагою.

Отже, за критерієм 3 перевага на боці МП систем. Однак, коли порівнюємо загальний рівень ФБ, у мікропроцесорних системах можуть виникнути проблеми, такі як неправильний розрахунок її функційної безпеки, неможливість повністю компенсувати вплив усіх завад (особливо високоенергетичних) і наявність недоліків у програмному забезпеченні. Отже, за критерієм «безпечність» релейні та РП системи можуть мати потенційну незначну перевагу порівняно з мікропроцесорними системами.

Слід урахувати, що в релейно-процесорних системах і мікропроцесорній диспетчерській централізації (якщо здійснено керування з центрального поста) на програмному рівні перевіряють умови безпеки, що створює невелику перевагу порівняно зі звичайними релейними системами.

Якщо порівняти ці самі критерії щодо ймовірності виникнення захисної відмови, то перевага релейних систем стає ще більш очевидною.

Імовірність виникнення захисної відмови елементів напільних пристроїв (критерій 7) залишається однаковою в будь-якому типі системи, оскільки напільне обладнання незмінне. Однак у постових пристроях імовірність виникнення захисної відмови елементів (критерій 8) вища в мікропроцесорних і релейно-процесорних системах через використання мікроелектронних компонентів. Це навіть з урахуванням того, що ймовірність неспрацювання реле першого класу надійності на кілька порядків більша, ніж для нерозмикання фронтового і загального контакту. Аналогічну ситуацію можна спостерігати зі стійкістю до завад (критерій 9), вимогами щодо живлення (критерій 11) і впливом кліматичних чинників (критерій 13).

При цьому в релейно-процесорних і мікропроцесорних системах уже чітко виражені недоліки програмного забезпечення (критерій 10), особливо в АРМах (пункт 5 недоліків МП систем). Крім того, створення безпечної структури мікропроцесорної системи призводить до ускладнення програмно-апаратного комплексу, що також збільшує ймовірність виникнення захисних відмов (критерій 12).

Отже, якщо за критерієм «безпечність» недоліки використання мікроелектронної техніки впливають на мікропроцесорні системи, то за критерієм «імовірності виникнення захисних відмов»

цей вплив уже спостерігають і на релейно-процесорних системах.

Але в сучасних системах впроваджено технічне діагностування, що підвищує показник безвідмовності. У мікропроцесорних системах діагностування постових пристроїв компенсує знижений показник імовірності виникнення захисної відмови. Технічне діагностування постової частини в МП системах виявляє передвідмовний стан і має надзвичайно високий показник виявлення відмов (критерії 15, 17). У релейно-процесорних системах діагностування переважно здійснювано для процесорної частини. Щодо релейної частини в РП системах і релейних системах з МДЦ, то діагностування відбувається в обмеженому обсязі та виконувано побічним методом.

Діагностування напільних пристроїв (критерії 14, 16) зазвичай виконують шляхом вимірювання їхніх вхідних і вихідних параметрів, таких як напруга і струм, а також віддаленого перегляду стану дискретних пристроїв (наприклад у сигнальній установці). Це дає змогу навченому персоналу оперативно отримувати необхідну інформацію, включаючи можливість перегляду архіву. Такий підхід до діагностування впроваджено як у мікропроцесорних, так і релейно-процесорних системах, а також реалізовано у вітчизняній системі мікропроцесорної диспетчерської централізації МДЦ-У.

Технічне діагностування є важливим аспектом, що сприяє зменшенню часу на технічне обслуговування пристроїв СЦБ (критерії 18, 19). Завдяки якісному діагностуванню в мікропроцесорних системах значно зменшується час, необхідний на обслуговування постових пристроїв, у системах РП і МДЦ цей показник зменшення часу не є високим. Наявність діагностування напільних пристроїв суттєво не впливає на скорочення часу їх обслуговування.

Проте збільшення часу на усунення відмов у системах на мікроелектронній елементній базі можливе через такий недолік, як залежність від виробника системи залізничної автоматики. Навчений персонал господарства сигналізації і зв'язку не завжди здатний самостійно усунути всі несправності (критерій 20), як це можливо в релейних системах, тому час на усунення відмов (наприклад у програмному забезпеченні) може бути досить тривалим. Крім того, через непоширеність певної системи в дистанції сигналізації і зв'язку виникає дефіцит елементів системи в обмінному фонді (критерій 21), що може спричинити затримки поїздів.

Застосування АРМів дещо розширило функційні можливості для господарства перевезень (критерій 22). Однак така перевага для

мікропроцесорних і релейно-процесорних систем є потенційною, а не реальною. Запитавши працівників господарства перевезень, який спосіб встановлення маршрутів є кращим: у традиційних системах чи мікропроцесорних системах, відповідь є майже одноставною: традиційний спосіб встановлення маршрутів є кращим, тобто перевага на боці маршрутного набору за допомогою кнопок пульта маніпулятора. Це можна пояснити так, що використання в АРМах вибору маршруту зі списку або вибору категорії маршруту, самостійне введення даних про характеристику рухомого складу збільшує кількість дій, які потрібно виконати, що у свою чергу більше навантажує людський мозок. Очевидна перевага за критерієм 22 є в МДЦ через наявність режиму «автодиспетчера».

Для систем із використанням АРМів необхідно розширювати функційні можливості, наприклад блокування об'єктів керування (у багатьох системах вже використовують), обмін даними з системою МДЦ, автоматизація маневрової та сортувальної роботи, автоматичне оповіщення навченого персоналу на колії.

Мікропроцесорні системи мають перевагу за критеріями 23, 24 та 25. Зміна взаємозалежності стрілок і сигналів відбувається на програмному рівні, а ув'язка з будь-якими пристроями - шляхом введення та виведення дискретних сигналів, що значно зменшує обсяг монтажу. МП і РП системи легко ув'язані з верхнім рівнем (наприклад МДЦ) без необхідності великої кількості обладнання, як у релейних системах.

За критерієм 26 перевага належить релейним системам. Хоча вартість будівництва мікропроцесорних систем є вищою, проте у випадку необхідності будівництва нового поста ЕЦ (критерій 27) шляхом зменшення площі поста перевага релейних систем трохи знижується.

Критерій 28: прив'язаність до виробника в системах на мікроелектронній елементній базі впливає не тільки на показник готовності, але й економічний аспект через необхідність витрат коштів на сервісне обслуговування.

Зменшення кількості реле в МП і РП системах (у МП системах реле все ж таки використовують) призводить до зменшення перевірок у ремонтно-технологічних дільницях (РТД). Завдяки цьому скорочується штат РТД, що дає економічну перевагу за критерієм 29.

Аналіз результатів розрахунків

Після порівняння та розрахунку матриць попарних порівнянь альтернатив (які не наведені) отримано результати у вигляді векторів пріоритетів альтернатив за кожним критерієм (табл. 1-4).

Таблиця 1

Вектори пріоритетів альтернатив за критеріями 1-6

| | | Критерій | | | | | |
|---------------|-------|----------|-------|-------|-------|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Альтер-натива | Р | 0,312 | 0,318 | 0,108 | 0,328 | 0,3 | 0,3 |
| | РП | 0,312 | 0,318 | 0,15 | 0,305 | 0,3 | 0,3 |
| | МП | 0,063 | 0,045 | 0,605 | 0,062 | 0,1 | 0,1 |
| | Р МДЦ | 0,312 | 0,318 | 0,137 | 0,305 | 0,3 | 0,3 |

Таблиця 2

Вектори пріоритетів альтернатив за критеріями 7-13

| | | Критерій | | | | | | |
|---------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Альтер-натива | Р | 0,25 | 0,391 | 0,391 | 0,391 | 0,399 | 0,424 | 0,437 |
| | РП | 0,25 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,152 | 0,119 | 0,113 |
| | МП | 0,25 | 0,067 | 0,067 | 0,067 | 0,05 | 0,034 | 0,04 |
| | Р МДЦ | 0,25 | 0,391 | 0,391 | 0,391 | 0,399 | 0,424 | 0,41 |

Таблиця 3

Вектори пріоритетів альтернатив за критеріями 14-21

| | | Критерій | | | | | | | | |
|---------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | |
| Альтер-натива | Р | 0,127 | 0,054 | 0,066 | 0,04 | 0,127 | 0,064 | 0,47 | 0,437 | |
| | РП | 0,262 | 0,142 | 0,247 | 0,161 | 0,262 | 0,156 | 0,11 | 0,159 | |
| | МП | 0,454 | 0,719 | 0,524 | 0,696 | 0,454 | 0,715 | 0,037 | 0,047 | |
| | Р МДЦ | 0,156 | 0,085 | 0,163 | 0,104 | 0,156 | 0,064 | 0,384 | 0,357 | |

Таблиця 4

Вектори пріоритетів альтернатив за критеріями 22-29

| | | Критерій | | | | | | | |
|---------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| Альтер-натива | Р | 0,048 | 0,096 | 0,122 | 0,119 | 0,445 | 0,109 | 0,528 | 0,089 |
| | РП | 0,156 | 0,249 | 0,201 | 0,197 | 0,172 | 0,189 | 0,082 | 0,159 |
| | МП | 0,156 | 0,558 | 0,602 | 0,613 | 0,073 | 0,598 | 0,041 | 0,666 |
| | Р МДЦ | 0,64 | 0,096 | 0,074 | 0,07 | 0,31 | 0,104 | 0,349 | 0,085 |

Розрахувавши вектор пріоритетів альтернатив за глобальним критерієм «безпе́чність» (рис. 2), можна побачити, що найбільша перевага в релейно-процесорних систем і релейних систем із МДЦ. Релейні системи дещо відстають, а мікропроцесорні системи займають ще нижчу позицію. Причини такого результату описані вище.

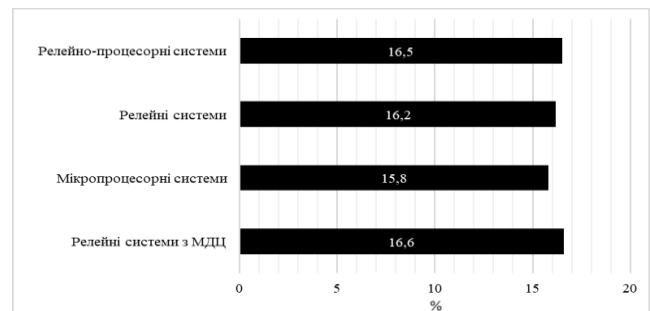


Рис. 2. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив за критерієм «безпе́чність»

Розрахунок вектора пріоритетів альтернатив за глобальним критерієм «безвідмовність і готовність» (рис. 3) демонструє, що мікропроцесорні системи мають найбільшу перевагу. Це зумовлено високим рівнем технічного діагностування постових пристроїв і скороченням часу, необхідного для технічного

обслуговування. На наступних позиціях розташовані релейні системи з МДЦ і звичайні релейні системи, тоді як релейно-процесорні системи значно відстають.

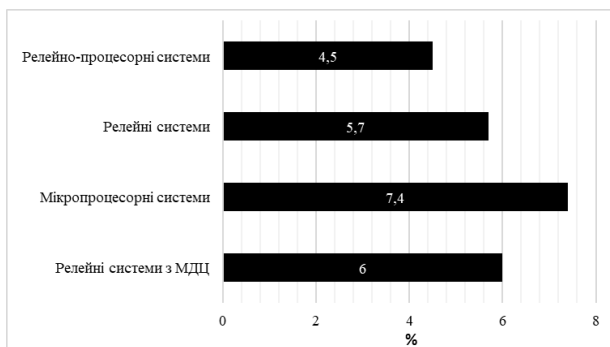


Рис. 3. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив за критерієм «безвідмовність і готовність»

Розглянувши вектор пріоритетів альтернатив за глобальним критерієм «технічні показники» (рис. 4), можна визначити, що релейні системи з МДЦ мають найбільшу перевагу завдяки своїм широким функційним можливостям для господарства перевезень. На другій позиції знаходяться мікропроцесорні системи з простою інтеграції з іншими пристроями та гнучкістю до змін у колійному розвитку. Третє місце – релейно-процесорні системи, а на четвертому місці опинилися релейні системи з очевидних причин.

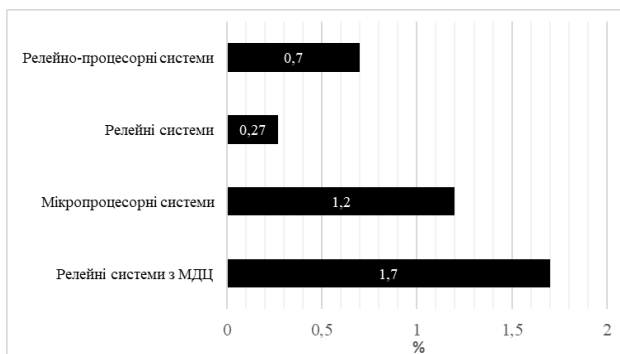


Рис. 4. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив за критерієм «технічні показники»

За вектором пріоритетів альтернатив за глобальним критерієм «економічні показники» (рис. 5) спостерігають такий розподіл: на першому місці релейні системи, другому – релейні системи з МДЦ, третьому – мікропроцесорні системи, четвертому – релейно-процесорні системи.

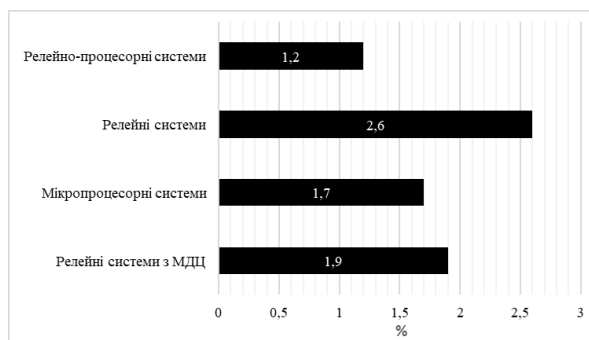


Рис. 5. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив за критерієм «економічні показники»

На рис. 6 подано вектор пріоритетів альтернатив за всіма критеріями. Отже, найдоцільнішою є впровадження релейної системи з мікропроцесорною диспетчерською централізацією. Потім ближчими за пріоритетом є мікропроцесорні системи. Релейні системи мають дещо нижчий пріоритет, а останню позицію займають релейно-процесорні системи. Якщо розглянути вектори пріоритетів (рис. 7) без урахування критерію «безпе́чність», який має значну вагу, то мікропроцесорні системи у пріоритеті порівняно з релейними системами з мікропроцесорною диспетчерською централізацією.

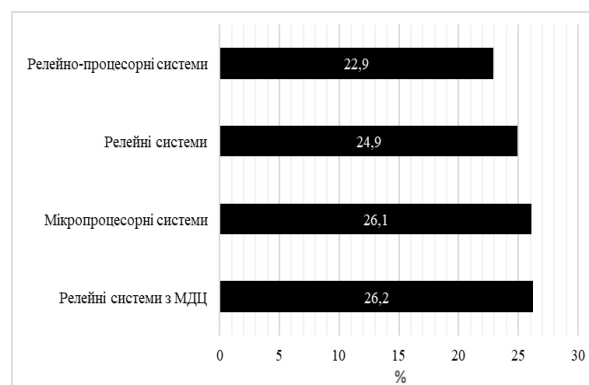


Рис. 6. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив

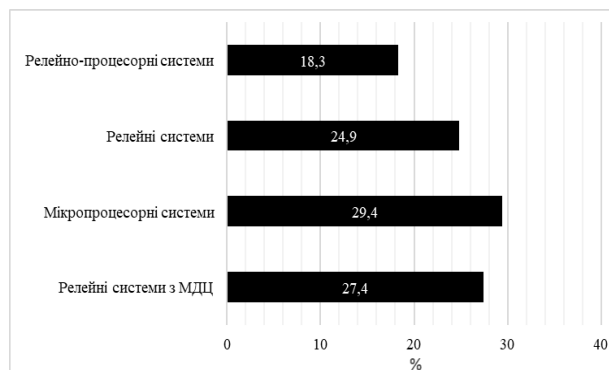


Рис. 7. Гістограма вектора пріоритетів альтернатив без урахування критерію «безпе́чність»

Примітка

Слід зазначити, що ці результати є узагальненими для основних видів систем. Порівнюючи, урахували, що системи застосовують на ділянках з інтенсивним рухом поїздів для визначення напрямів подальшого розвитку систем. У практичному застосуванні методу МАІ при виборі типу системи за елементною базою чи виробником потрібно враховувати інтенсивність руху поїздів та інші чинники застосування системи, тобто співвідношення «безпечність» – «безвідмовність і готовність» – «технічні показники» – «економічні показники», і вже конкретно орієнтуватися на вид системи (АБ, ЕЦ, АПС і т. д.).

Розвиток систем

Отже, застосування мікропроцесорних систем не завжди виправдане, особливо якщо врахувати їх використання на ділянках з неінтенсивним рухом поїздів, де економічні показники мають більшу вагу. Для виконання багатьох функцій, характерних для мікропроцесорних систем, можна застосувати релейні системи з МДЦ. Подальший розвиток систем, заснованих виключно на реле, неможливий, оскільки релейні системи вичерпали свої можливості. Розрахунки показали, що застосування релейно-процесорних систем є недоцільним через низькі показники безвідмовності, готовності та економічної ефективності. Тому подальший розвиток можливий у мікропроцесорних систем і МДЦ або додаткових надбудовах для релейних систем.

Також можна розглянути пропозицію, не використовувати в жодній вітчизняній системі мікропроцесорної диспетчерської централізації: із застосуванням МДЦ встановлення АРМ ДСП з можливістю керування станцією з нього (у тому числі на великих станціях). Тобто, використовуючи апаратуру диспетчерської централізації, без значних витрат впровадити релейно-процесорну централізацію.

Збільшити перевагу мікропроцесорних систем над застосуванням надбудов можна шляхом розроблення єдиного стандартного рішення (типового альбому) для мікропроцесорних систем, власником якого має бути АТ «Укрзалізниця». За такого підходу можна підвищити безпечність і безвідмовність систем за рахунок вибору найкращих технічних рішень, позбутися залежності від конкретних виробників, значно зменшити вартість впровадження системи, а також постійно удосконалювати мікропроцесорні системи шляхом впровадження раціоналізаторських пропозицій від працівників господарства сигналізації і зв'язку (що практично неможливо, коли система належить приватному підприємству).

Другий, безсумнівно, найважливіший, крок до вдосконалення полягає в застосуванні повної **підсистеми технічного діагностування (ПСТД)**, зокрема для напільних пристроїв. Однією з проблем діагностики в сучасних системах є необхідність проведення аналізу отриманих даних вручну, а навченому персоналу доводиться ухвалювати рішення про стан пристроїв. Тому необхідно розроблення ПСТД, яка зможе:

- моніторити стан систем і її параметри;
- виявляти передвідмовний стан елементів із високим коефіцієнтом виявлення;
- досить точно виявляти причини відмови;
- виявляти небезпечні стани з можливістю впливу на систему автоматики;
- змінити стратегію технічного обслуговування на обслуговування за фактичним станом об'єкта;
- давати рекомендації навченому персоналу;
- контролювати виконання графіка технічного обслуговування.

Створення такої підсистеми є непростю науковою проблемою, бо потрібно відносно дешевим методом виконувати складні технологічні процеси. Оскільки кожен елемент залізничної автоматики потребує індивідуального наукового дослідження, необхідно створити схему розподілу елементів діагностування (рис. 8).

Діагностування пристроїв залізничної автоматики

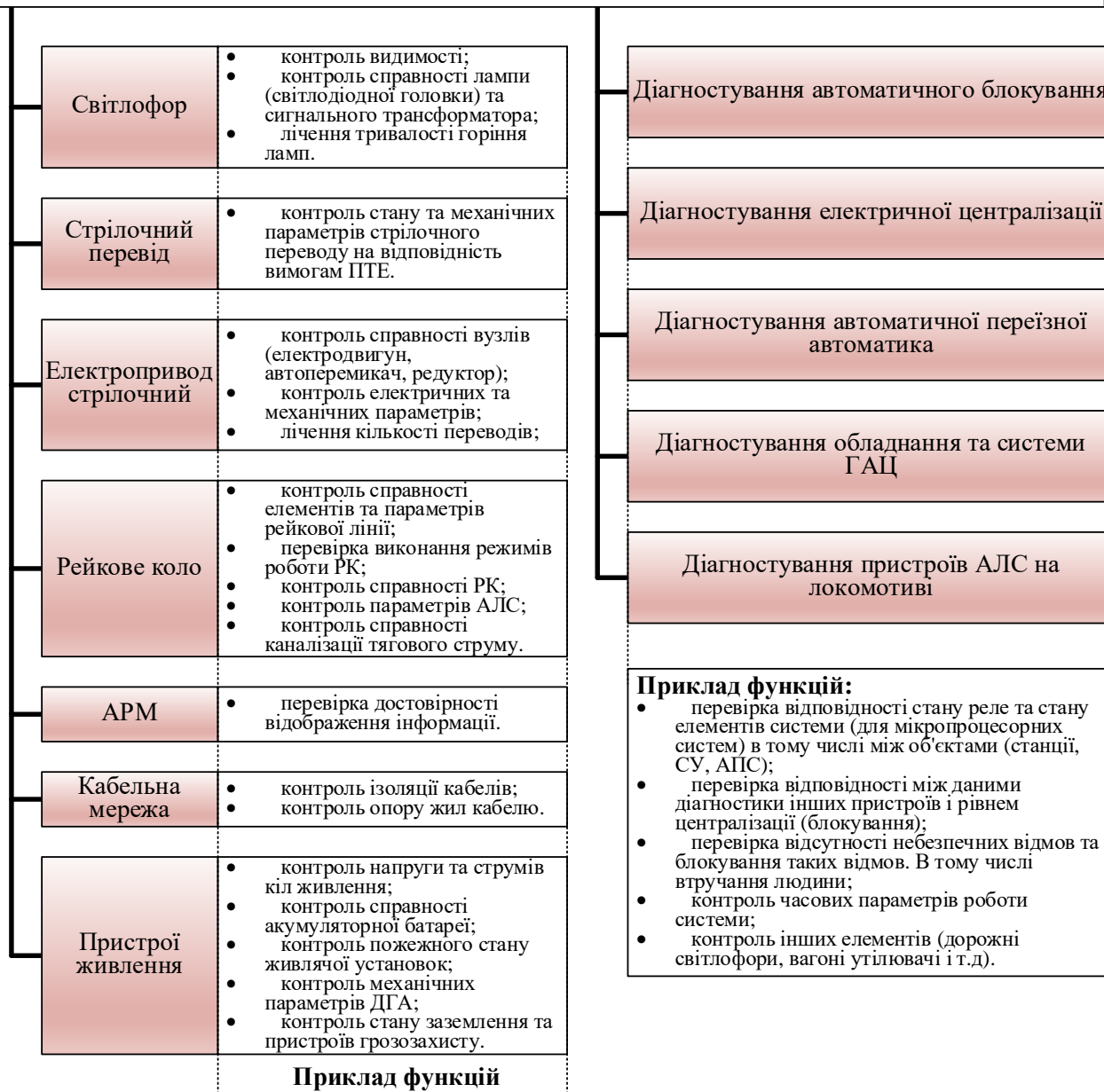


Рис. 8. Схема розподілу елементів діагностування

Подана схема є узагальненою і потребує детального дослідження і розроблення дерева функцій. На сьогодні деякі функції вже реалізовані, наприклад діагностування пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації, логічної частини електричної централізації та автоблокування в МП системах, були об'єктом і предметом досліджень, наприклад контроль стану електродвигунів і стрілочних переводів [21]. Інші функції потребують наукових досліджень або інженерного розроблення.

Упровадження потужної ПСТД не тільки підвищить ефективність мікропроцесорних систем, але й стимулюватиме розвиток інноваційних систем залізничної автоматики:

1. **Збільшення автоматизованих функцій до повної автоматизації перевізного процесу:** об'єднання залізничної системи країни в єдину інтегровану мережу дасть змогу машинним способом визначати найефективніший спосіб використання наявних ресурсів, зокрема розраховувати оптимальні графіки руху поїздів. Це призведе до значного економічного ефекту завдяки збільшенню перевізної спроможності, скороченню часу доставлення вантажів, а також зменшенню кількості персоналу галузі перевезень (особливо чергових по станції та диспетчерів).

2. Систем інтервального регулювання руху поїздів на основі рухомих блок-ділянок.

3. Систем автоматичного керування поїздом (автомашиніст).

4. Систем зі повною автоматизації маневрових і сортувальних робіт.

Необхідно визначити, який з елементів потребує першочергового дослідження. Для цього необхідно розглянути гістограму відмов пристроїв залізничної автоматики за елементами (рис. 9) [29].

Висновок

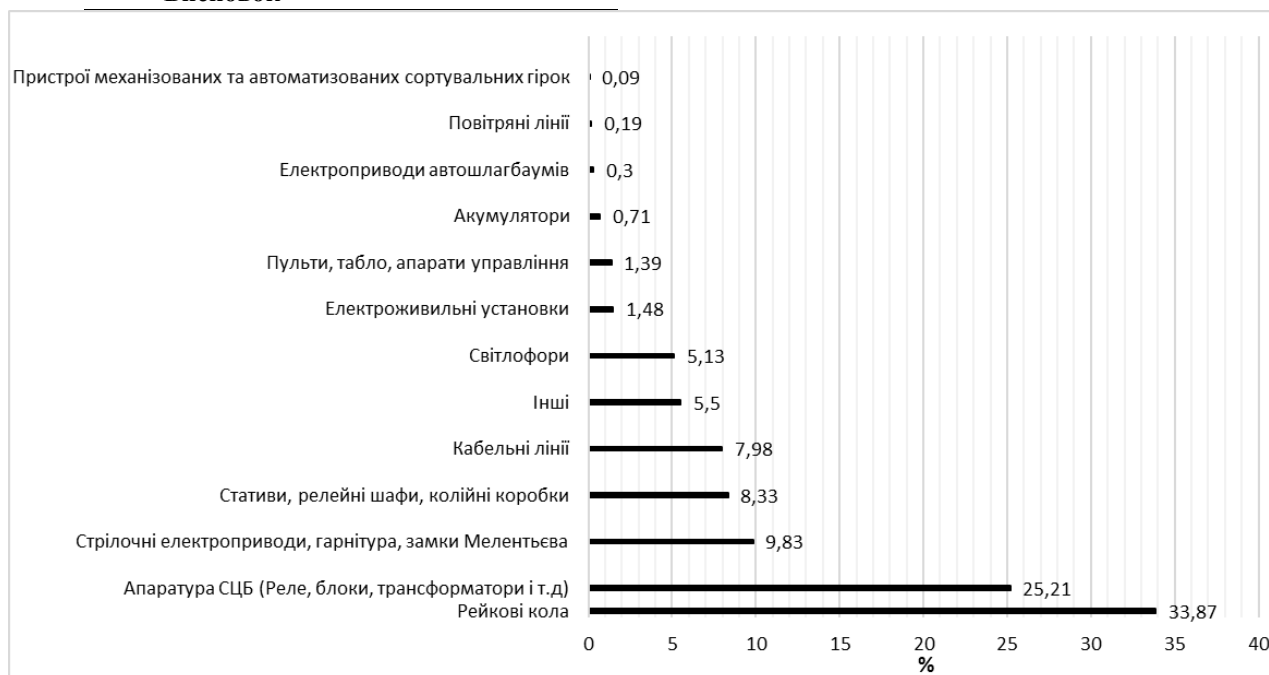


Рис. 9. Гістограма розподілу відмов пристроїв залізничної автоматики за елементами

Аналізуючи гістограму, можна виявили, що виділяють два елементи – рейкові кола та апаратура СЦБ. Однак офіційна статистика Департаменту автоматики і телемеханіки є недостовірною. Наприклад, рейкові кола є найбільш пошкоджуваним елементом: у 2021 році було зареєстровано 680 відмов, що в середньому становить дві відмови рейкового кола на добу по всій Україні, що значно недооцінює реальний обсяг проблеми. Можна припустити, що справжня кількість відмов рейкових кіл перевищує 20000 на рік по всій Україні.

На основі практичного досвіду другим елементом за частотою відмов мають бути стрілки, а не апаратура СЦБ. Причиною занижених показників кількості відмов може бути часте приховування пошкоджень пристроїв СЦБ навченим персоналом служб сигналізації і зв'язку, а також працівниками господарства перевезень.

Пошкодження апаратури СЦБ і монтажу на стативах і релейних шафах потребують аналізу принципових схем і висококваліфікованих фахівців, тому усунення таких пошкоджень займає тривалий час, і приховати їх вдається рідше. Насправді показник відмов в апаратурі та монтажі має бути незначним порівняно з іншими пошкодженнями, такими як рейкові кола, стрілки, світлофори, кабельні мережі.

Отже, показник відмов пристроїв СЦБ, за офіційною статистикою, може бути завищеним у 10-

30 разів. Це також підкреслює необхідність застосування функції виявлення і архівації відмов.

Проте, оскільки відмови рейкових кіл трапляються найчастіше, першочерговим завданням для майбутніх досліджень є **розроблення методів і способів діагностування рейкових кіл.**

Список використаних джерел

1. Автоматизовані станційні системи керування рухом поїздів: навч. посіб. / В. І. Мойсеєнко, С. Л. Пархоменко, М. М. Чепцов, Т. А. Коцюба; за ред. В. І. Мойсеєнка. Харків: ФПД ФО "Морозов В.О." 2013. 394 с.
2. Мікропроцесорні системи управління рухом поїздів МПЦ-У та МАБ-У: навч. посіб. для студ. вузів залізнич. трансп. / В. І. Басов, В. В. Єлисеєв, О. В. Петренко та ін. Київ: Макрос, 2014. 318 с.
3. Мікропроцесорна диспетчерська централізація «КАСКАД»: навч. посіб. / М. І. Данько, В. І. Мойсеєнко, В. З. Рахматов та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 176 с.
4. Панченко С. В., Мороз В. П., Змії С. О., Турчинов Р. В. Дослідження мікропроцесорної гіркової централізації: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Станційні системи автоматики». Харків: УкрДУЗТ, 2016. 18 с.

5. Нейчев О. В. Системи диспетчерського управління: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2015. 289 с.
6. Проектні рішення 421418.001 ПР-001. Мікропроцесорна централізація стрілок і сигналів МПЦ-У. : ПрАТ «СНВО «Імпульс», 2014. 63 с.
7. Проектні рішення 421428.001 ПР-001. Мікропроцесорне автоматичне блокування МАБ-У. : ПрАТ «СНВО «Імпульс», 2013. 34 с.
8. Проектні рішення 421447.001 ПР-002. Мікропроцесорна система диспетчерської централізації та диспетчерського контролю МДЦ-У. : ПрАТ «СНВО «Імпульс», 2013. 133 с.
9. Релейно-процесорна централізація «КАСКАД». Проектні рішення 13436911.352040.ПР.02.02. : ТОВ «Антрон»; ТОВ «НВО Трансавтоматика», 2007. 69 с.
10. Мікропроцесорна система диспетчерської централізації «КАСКАД». Типові проектні рішення 13436911.1 84 154.ПР.40.4. : ТОВ «Антрон», 2007. 96 с.
11. Мікропроцесорна централізація стрілок та сигналів 01.ESB-UA-2008. Проектні рішення. Виконавчі схеми. Зволен-Ужгород, 2008. 51 с.
12. Релейно-процесорная централизация стрелок и сигналов. БРЦ-М2. Проектные решения МИСАТ.10006-МП. Принципиальные схемы. : ООО «НПП КС-МИСАТ» , 2008. 82 с.
13. Продукція для залізниці. Impulse. URL: <https://impulse.ua/index.php/ua/produksiya-2/production-for-the-railway> (дата звернення: 01.05.2024).
14. Railwayautomatic. URL: <https://rwa.ua/uk/> (дата звернення: 01.05.2024).
15. ООО «НПП КС-МИСАТ». URL: <http://misat.com.ua> (дата звернення: 01.05.2024).
16. Кустов В. Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 156 с.
17. Правила технічної експлуатації залізниць України. Київ: Транспорт України, 2003. 256 с.
18. Норми технологічного проектування пристроїв автоматики і телемеханіки на залізничному транспорті України. ЦШ-0027. Київ: Транспорт України, 2003. 95 с.
19. Інструкція з сигналізації на залізницях України. ЦШ-0001. Київ: Транспорт України, 2008. 158 с.
20. Інструкція з руху поїздів та маневрової роботи залізниць України. ЦД-0058. Київ: Транспорт України, 2005. 259 с.
21. Buriak S., Malovichko V., & Romantsev I. (2018). Діагностування стрілочних переводів в сучасних мікропроцесорних системах централізації. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, (16). DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172670>.
22. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів. Системи керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Чинний від 01.07.2003.
23. ДСТУ EN 50121-4:2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Частина 4. Емісія завад і несприйнятливості сигнальної та телекомунікаційної апаратури (EN 50121-4:2016, IDT). Чинний від 01.01.2021.
24. ДСТУ EN 50126-1:2015. Залізничний транспорт. Специфікація та демонстрація надійності, доступності, безпеки і ремонтпридатності (РАМН). Частина 1. Основні вимоги та загальний процес (EN 50126-1:1999/АС:2010, IDT). Поправка № 2:2018. Чинний від 01.01.2019 р.
25. ДСТУ EN 50128:2022. Залізничний транспорт. Системи телекомунікаційні, сигналізаційні та системи для оброблення даних. Програмне забезпечення для систем управління та захисту на залізницях (EN 50128:2011, IDT).
26. ДСТУ EN 50129:2019. Залізничний транспорт. Системи зв'язку сигналізації та оброблення даних. Електронні сигналізаційні системи безпеки (EN 50129:2018, IDT). Чинний від 01.01.2020 р.
27. Thomas L. Saaty. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process. Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL. 102 (2), 2008, P. 251–318.
28. Переваги та недоліки методу аналізу ієрархій. URL: <https://dss.tg.ck.ua/2019/06/22/3137> (дата звернення: 22.05.2024).
29. Аналіз експлуатаційної роботи господарства сигналізації та зв'язку за 2020, 2021, 2022 рр. Київ: Департамент автоматики та телекомунікацій АТ «Укрзалізниця».

Kaliuta Yu. V., Ananieva O. M. Analytical review of railway automation systems

Abstract. The article examines railway automatic systems from the point of view of their elemental base. An analysis of literary sources was carried out, from which the advantages of using microprocessor systems were highlighted. Their shortcomings, which were not reflected in the literature, are considered separately. A solution to the topical issue of system selection through a hierarchical structure based on the analytic hierarchy process (AHP) is proposed for selecting the type of system to be implemented, which can be used not only for element-based comparison.

A generalized analysis of the expediency of systems implementation was conducted. The comparison is made according to such global criteria as «safety», «reliability and availability», «technical indicators» and «economic

indicators». A detailed analysis showed that considering the factor of intensive train traffic, it is reasonable to implement a relay system with a microprocessor based centralized traffic control system and a microprocessor system, while the conventional relay system has a slightly lower performance. The feasibility of implementing relay-processor systems has not been confirmed.

On the basis of the conducted analysis, the necessary steps in the development of railway automation systems have been determined, among which the most important today are: the creation of a single standard solution for microprocessor systems, the owner of which will be JSC «Ukrzaliznytsia», and the development of a complete subsystem of technical diagnostics of railway automatic devices. The implementation of this subsystem will contribute to significant changes not only in the field of signaling and communication, but also in railway transport as a whole. The development of methods for diagnosing rail circles is defined as a priority direction. Some suggestions for improving the systems are also presented.

Keywords: microprocessor systems, microprocessor based centralized traffic control system, technical diagnostics subsystem, track circuits, the Analytic Hierarchy Process (AHP).

Калиута Юрій Васильович, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: yuriikaliuta@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2150-8396>.

Kaliuta Yurii, post-graduate of the Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: yuriikaliuta@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2150-8396>.

Ананьєва Ольга Михайлівна, д.т.н., професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Ananieva Olha, Dr.Sc (Tech.), Professor of the Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

УДК 621.316.1

DOI: 10.18664/iksz.t.v29i3.313625

АНАНЬЄВА О. М., д.т.н., професор,
БАБАЄВ М. М., д.т.н., професор,
ДАВИДЕНКО М. Г., к.т.н., доцент,
ПАНЧЕНКО В. В., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою

Величини електричних параметрів обмотки статора асинхронного трифазного електродвигуна суттєво визначають його технічний стан і тому можуть бути використані з метою його діагностики. Вказані електричні параметри можна неперервно контролювати шляхом введеного в обмотку малого тестового струму відомої частоти, вимірюючи його амплітуду та початкову фазу. Точність їх вимірювання може виявитися неприпустимо низькою з причини наявності коротких імпульсних завод у вимірювальній інформації. У роботі отримане імовірнісне математичне описання реалізації суми сигналу та імпульсної завади у вигляді функції правдоподібності цієї реалізації. Вираз для цієї функції дає змогу описати характерний випадок, в якому на інтервалі часу, вільному від імпульсної завади, відсутні будь-які завади взагалі. Для тестового струму, який є синусоїдним з відомою частотою, але невідомими амплітудою та початковою фазою, отримано математичні вирази для оцінок цих двох параметрів за результатами спостереження вказаного струму на фоні одиночної імпульсної завади. За цими математичними виразами, використовуючи функцію правдоподібності як цільову, побудовано структурну схему пристрою оцінювання амплітуди та початкової фази струму тестування обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна. Процедура оцінювання параметрів тестового сигналу сформовано у вигляді, який дає змогу застосувати широке коло доступних методів розрахунку кінцевих величин оцінок при максимізації функції правдоподібності за часовими параметрами імпульсної завади.

Ключові слова: електродвигун, обмотка статора, тестовий сигнал, імпульсна завада, спектральна густина, функція правдоподібності.

Вступ

Структурно детерміновані сигнали широко використовують при тестуванні технічного стану різноманітного обладнання. Відстежування величин параметрів таких сигналів дає змогу своєчасно фіксувати виникнення несправностей або настання передумов до них і у такий спосіб приймати оперативні рішення щодо технічного обслуговування тестового обладнання. Важливим класом такого обладнання є тягові електродвигуни локомотивів. Дотримання їхніх конструктивно встановлених характеристик критично залежить від технічного стану їхніх обмоток, який однозначно пов'язаний з електричними параметрами цих обмоток. Ці величини можна контролювати шляхом вимірювання параметрів спеціально введених тестових струмів. Точному визначенню параметрів перешкоджають заводові електричні коливання, які потрапляють до складу вимірювальної інформації. Це призводить до помилок у прийнятті рішень щодо технічного стану двигуна.

Із зростанням кількості електричного обладнання, яке утворює завади, зростає й імовірність таких помилок. Отже, завдання отримання якомога точніших оцінок параметрів тестових сигналів в умовах дії завод стає все більш актуальним.

Постановка проблеми і аналіз досліджень і публікацій

Додавання каліброваного тестового струму до функціонально основного струму обмотки з метою контролю її технічного стану доволі широко висвітлено в дослідницьких публікаціях [1–4]. Розглянуто технічні рішення щодо внесення тестового струму, методики пов'язування результатів спостережень із технічним станом двигунів та ступень впливу тестового струму на обертовий момент. Усі розглянуті аспекти тестування не містять урахування електричних завод. Цей бік вимірювань стосовно до обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна розглянуто в роботі [5].

© АНАНЬЄВА О. М., БАБАЄВ М. М., ДАВИДЕНКО М. Г., ПАНЧЕНКО В. В. 2024

В результаті аналізу спектральних характеристик наявних завад визначено межі частотного діапазону, практично вільного від спектральних складових майже усіх цих завад. Виключення складає лише одиночна імпульсна завада. Для оцінювання параметрів тестового сигналу, спостереженого на тлі цієї завади, запропоновано використати метод найменших квадратів. Гнучкість запропонованого підходу є обмеженою з причини неврахування часового розташування та протяжності завадового імпульсу. Відносно точок входу та виходу тестового струму обмотка є пасивним активно-реактивним двополосником, а відтак порядок її комплексного опору не перевищує двох. Такий опір має лише два параметри – абсолютну величину та аргумент. Тому при заданій електричній схемі для їхнього вимірювання достатньо використовувати двопараметричний струм. Такий струм має місце при живленні обмотки від тестового генератора синусоїдної напруги з відомими амплітудою, фазою та частотою. За цих умов абсолютна величина та аргумент комплексного опору обмотки однозначно визначені амплітудою та початковою фазою утвореного в ній тестового синусоїдного струму. Фундаментальний підхід до оцінювання цих двох параметрів описаний в роботі [6]. Але він охоплює тільки випадок спостереження сигналу на фоні безперервно діючої завади. Положення, розвинуті в указаній роботі, конкретизовані в статтях [7–9] для оцінювання амплітуди та початкової фази синусоїдного коливання за наявності адитивного гаусівського шуму та ефектів часової дискретизації вимірюваного сигналу. Представлені результати є справедливими лише для великих відношень «сигнал/завада», і це обмежує сферу їхнього застосування. Протилежна крайність – припущення про мале відношення «сигнал/завада» – зі свого боку, обмежує застосовність результатів роботи [10]. Для зменшення впливу потужних імпульсних завад широко використовують каскадне вмикання широкосмугового фільтра, амплітудного обмежувача та вузькосмугового фільтра [11]. Але це пристрій жорстко заданої структури, не адаптований відносно параметрів завадового імпульсу. Відомим способом боротьби з імпульсною завадою є її бланкування, при цьому моменти початку та кінця імпульсу запропоновано визначити за величиною миттєвої потужності суми сигналу та завади [12]. Швидкодія оброблення сигналу тут обмежена потребою виконання попереднього «навчання» алгоритму для визначення статистичних характеристик вхідних коливань. Повну компенсацію впливу імпульсної завади на вхідний сигнал розглянуто в статті [13]. Проте використаний в цьому методі окремий канал приймання завади наявний далеко не завжди. Вимірювання параметрів синусоїдного коливання з використанням бланкування імпульсної завади в одноканальному приймачі розглянуто в роботі [14]. Застосовано метод оцінювання параметрів за

критерієм максимуму функції правдоподібності. Отримані результати, втім, не можуть бути на пряму поширені на випадок, коли протягом частини корисного сигналу повністю відсутня будь-яка завада. З аналогічної причини обмеженою є застосовність базованого на тому ж критерії методу оцінювання параметрів за подання завади у вигляді амплітудно-модульованого коливання з шумовою адитивною модуляцією [15]. Узагальнюючий підрахунок впливу бланкування на відношення «сигнал/шум» на виході приймача наведено в роботі [16]. Отримані результати охоплюють ідеальний випадок, в якому відомі час початку та протяжність імпульсу завади.

Наведене вище дає підстави дійти висновку, що на сьогодні існує широке розмаїття методів оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, спостереженого на фоні як неперервних, так і імпульсних завад. Але не вдалося виявити публікацій, в яких був би описаний розв'язок задачі статистично обґрунтованого оцінювання амплітуди та початкової фази такого сигналу в умовах, коли на інтервалі спостереження діє виключно одиночна імпульсна завада з невідомими часом початку, протяжністю та енергією. Ці умови є характерними при формуванні струму, що спостерігається при тестуванні обмоток статора асинхронного тягового електродвигуна. Розв'язання цієї задачі дало б змогу підвищити ефективність діагностики таких двигунів.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – синтез пристрою оцінювання амплітуди та початкової фази синусоїдного сигналу відомої частоти, що спостерігається на фоні одиночної імпульсної завади з невідомими часовими параметрами та енергією.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано три задачі:

- 1) знаходження математичного виразу для функції правдоподібності суми структурно детермінованого сигналу та одиночної імпульсної завади;
- 2) знаходження виразів для максимально правдоподібних оцінок амплітуди та початкової фази синусоїдного сигналу відомої частоти, спостереженого за вказаних вище умов;
- 3) обудова структурної схеми пристрою, що формує вказані вище оцінки на базі спостереженої реалізації суми синусоїдного струму та одиночної імпульсної завади.

Основна частина

Знаходження функції правдоподібності суми сигналу та імпульсної завади

Розглянемо ситуацію, коли структурно-детермінований сигнал $s(t, \vec{\lambda})$ спостерігається в сумі з імпульсною завадою $n(t)$, протяжність τ_p якої не перевищує протяжності сигналу:

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t),$$

де t – час;

$\vec{\lambda}$ – вектор інформаційних параметрів сигналу;

$n(t)$ – імпульсна завада у вигляді відрізка гаусівського стаціонарного випадкового процесу з прямокутною обвідною та спектральною густиною

потужності, рівномірною в смузі частот сигналу $[-F_p, F_p]$:

$$N_p(f) = \begin{cases} 0,5N_p & \text{при } f \in [-F_p, F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases} \quad (1)$$

Часові співвідношення між сигналом і завадою проілюстровані рис. 1.

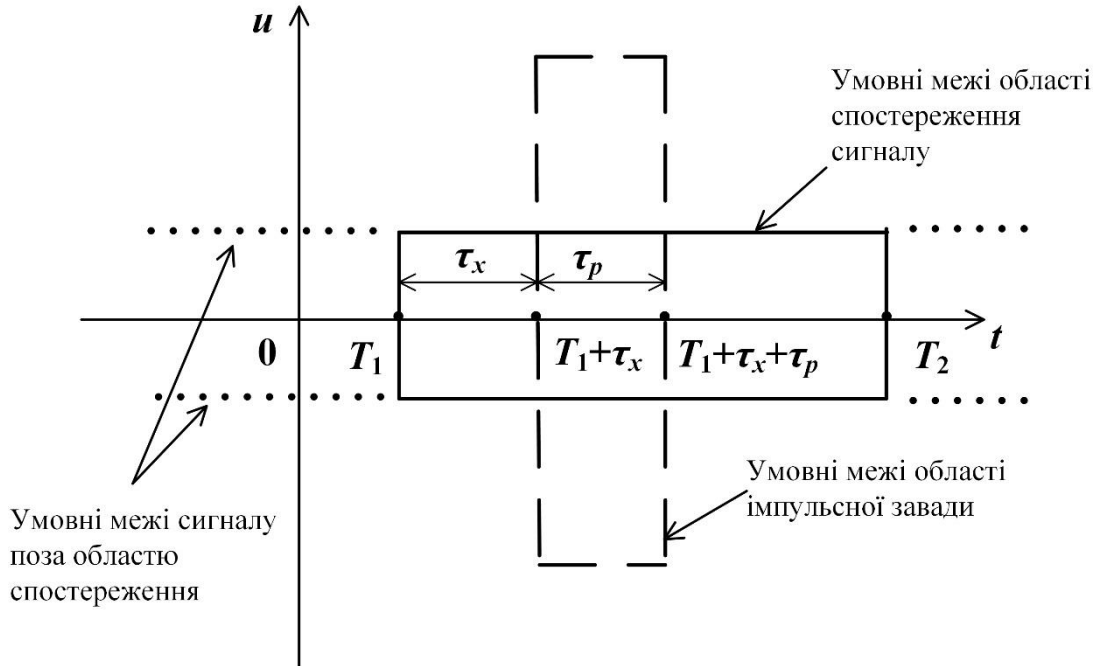


Рис. 1. Часові співвідношення між сигналом та імпульсною завадою:

T_1 і T_2 – відповідно початок та кінець інтервалу спостереження;

τ_x – зсув моменту виникнення завади відносно початку інтервалу спостереження; τ_p – тривалість імпульсу завади

Прийнемо до розгляду допоміжне коливання

$$v(t) = u(t) + n_0(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t) + n_0(t),$$

де $n_0(t)$ – неперервний на інтервалі спостереження $[T_1, T_2]$ незалежний від $n(t)$ гаусівський стаціонарний випадковий процес із спектральною густиною потужності

$$N_p(f) = \begin{cases} 0,5N_p & \text{при } f \in [-F_p, F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases}$$

Нехай допоміжне коливання $v(t)$ продискретизоване за часом з інтервалом

$$\Delta t = \frac{1}{2F_p}.$$

Обробці підлягає реалізація коливання $v(t)$ у вигляді сукупності його відліків

$$v_k = s_k(\vec{\lambda}) + n_k + n_{0k} = u_k + n_{0k}. \quad (3)$$

де $v_k = v(k\Delta t)$, $s_k(\vec{\lambda}) = s(k\Delta t, \vec{\lambda})$, $n_k = n(k\Delta t)$, $n_{0k} = n_0(k\Delta t)$.

Тут k – номер відліку, що лежить в інтервалі $[k_1, k_2]$, $k_1 = \text{Int}[2F_p \cdot T_1] + 1$; $k_2 = \text{Int}[2F_p \cdot T_2]$.

Відліки гаусівського випадкового процесу, взяті з інтервалом, визначеним співвідношенням (5), незалежні. Математичне очікування допоміжного коливання

$$E\{v_k\} = s_k(\vec{\lambda}).$$

Кореляційна матриця відліків допоміжного коливання

$$\begin{aligned} E\{[v_k - s_k(\vec{\lambda})] \cdot [v_m - s_m(\vec{\lambda})]\} &= E\{[n_k + n_{0k}] \cdot [n_m + n_{0m}]\} = \\ &= N_p F_p \delta_{km} + N_0 F_p \delta_{km}, \end{aligned}$$

де δ_{km} – символ Кронекера.

Звідси дисперсія допоміжного коливання дорівнює

$$\sigma_0^2 = N_0 F_p$$

на інтервалі номерів відліків, на якому присутні сигнал та імпульсна завада, та

$$\sigma_{p0}^2 = (N_p + N_0) F_p$$

на інтервалі, де присутні обидві завади n_{0k} та n_k .

З огляду на зазначені вище незалежності відліків сумарної гаусівської завади можна записати спільну щільність імовірності реалізації $v = \{v_{k1}, v_{k1+1}, \dots, v_{k2}\}$ як

$$p(v|\vec{\lambda}) = \prod_{k=k_1}^{k_2} p(v_k|\vec{\lambda}),$$

де $p(v_k|\vec{\lambda})$ – умовна по $\vec{\lambda}$ щільність ймовірності k -го дискрету допоміжного коливання.

Введемо позначення

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \text{Int}[2F_p(T_1 + \tau_x)] + 1, \\ k_{x2} &= \text{Int}[2F_p(T_1 + \tau_x + \tau_p)] \end{aligned}$$

для меж імпульсу та

$$k_{\tau p} = \text{Int}[2F_p \tau_p]$$

для протяжності імпульсу в дискретах часу.

Позначимо як Θ_p діапазон номерів дискретів, в якому знаходиться імпульсна завада. Позначимо як Θ_0 діапазон номерів дискретів, що лежать поза імпульсом:

$$\begin{aligned} \Theta_p &= (T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p), \\ \Theta_0 &= [T_1, T_1 + \tau_x] \cup [T_1 + \tau_x + \tau_p, T_2]. \end{aligned}$$

Відповідно до виразу (11) можна записати, що

$$p(v|\vec{\lambda}) = \prod_{\Theta_0} p(v_k|\vec{\lambda}) \cdot \prod_{\Theta_p} p(v_k|\vec{\lambda}) = \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\prod_{\Theta_0} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0 F_p}} \cdot e^{-\frac{|v_k - s_k(\vec{\lambda})|^2}{2N_0 F_p}} \right\} \times \\ &\times \prod_{\Theta_p} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi(N_0 + N_p) F_p}} \cdot e^{-\frac{|v_k - s_k(\vec{\lambda})|^2}{2(N_0 + N_p) F_p}} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

При спрямуванні величини N_0 до нуля перший співмножник набуває вигляду $\prod_{\Theta_0} \delta[u_k - s_k(\vec{\lambda})]$,

оскільки при цьому $n_0=0$ та $v_k=u_k$; вираз $\delta[x]$ означає одновимірну дельта-функцію аргументу x . Як відомо, $\prod_{i=1}^N \delta(x_i) = \delta^N(x_1, x_2, \dots, x_N)$, причому $\int_{x_1, \dots, x_N} \delta^N(x_1, \dots, x_N) d^N x = 1$, де $\delta^N(x_1, \dots, x_N) \in N$ -вимірною дельта-функцією. Тому

$$\begin{aligned} &\prod_{\Theta_0} \delta[u_k - s_k(\vec{\lambda})] = \\ &= \delta^{k_2 - k_1 + 1 - k_{\tau p}} [u_{k_1} - s_{k_1}(\vec{\lambda}), u_{k_1+1} - s_{k_1+1}(\vec{\lambda}), \dots, u_{k_2} - s_{k_2}(\vec{\lambda})] \end{aligned} \quad (10)$$

тобто δ -функція тут має стільки вимірів, скільки відліків знаходиться на ділянці, не перекритій імпульсом завади. Така δ -функція не дорівнює нулю, коли для кожної k -ої координати виконана рівність $u_k - s_k = 0$. При спрямуванні до нуля відстані Δt між дискретами u_k коливання $u(t)$ права частина рівності (16) набуває фізичного сенсу функції $\delta[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]$, котра не дорівнює нулю, якщо в кожен момент часу t діє рівність $u(t) - s(t, \vec{\lambda}) = 0$. Обсяг простору, охопленого цією функцією, дорівнює одиниці.

Другий співмножник виразу (15) з використанням теореми відліків можна, як показано в роботі [14], представити в неперервному часі:

$$\begin{aligned} p_p(v|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) &= \\ &= \frac{1}{[2\pi(N_0 + N_p) F_p]^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_0 + N_p} \int_{T_1 + \tau_x}^{T_1 + \tau_x + \tau_p} [v(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} \end{aligned}$$

При спрямуванні величини N_0 до нуля отримаємо з останнього виразу, що

$$\begin{aligned} p_p(v|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) &= p_p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \\ &= \frac{1}{(2\pi N_p F_p)^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_p} \int_{T_1 + \tau_x}^{T_1 + \tau_x + \tau_p} [u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} \end{aligned}$$

Отже, спрямування N_0 до нуля переводить умовну щільність імовірності (15) реалізації v допоміжного коливання в умовну щільність імовірності реалізації u реально спостереженого коливання

$$p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \delta[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]_{t \in \Theta_0} \times p_p(u|\vec{\lambda}),$$

де перший співмножник обчислюють по ділянці, вільній від імпульсу завади, а другий співмножник – по ділянці, на якій діє імпульс завади. Максимум функції (19) має місце при дотриманні умови

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}), t \in \Theta_0.$$

Однак ця умова малоконструктивна з точки зору синтезу пристрою оцінювання, оскільки попросту означає, що треба способом перебору підібрати $\vec{\lambda}$ та величини τ_x і τ_p (які визначають інтервал Θ_0 при відомому T_1) так, щоб рівність (20) була виконана. Крім того, неідеальність пристрою зберігання реалізації u та пристрою формування сигналу $s(t, \vec{\lambda})$ не забезпечать на практиці виконання рівності (20). Тому уявляється більш конструктивним кроком отримання неперервного по параметрах наближеного виразу для $p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p)$. Безпосередньо пов'язаним з виводом точного виразу (19) варіантом дій вбачається апроксимація цього виразу, отримана з виразу (15) при вельми малій, але все ж ненульовій величині N_0 . Використавши стосовно до (15) теорему відліків аналогічно тому, як це було зроблено при виводі виразу (17), отримаємо для довільно малих числових значень величини N_0 (при цьому $N_0 \ll N_p$), що

$$p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx p(v|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2-T_1-\tau_p)}} e^{-\frac{1}{N_0} \int_{\Theta_0} [u(t)-s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} \times \frac{1}{(2\pi N_p F_p)^{F_p T_p}} e^{-\frac{1}{N_p} \int_{\Theta_p} [u(t)-s(t, \vec{\lambda})]^2 dt}.$$

Введемо функцію

$$\Phi(t, \tau_x, \tau_p) = \begin{cases} 1, & t \in \Theta_0; \\ \frac{N_p}{N_0}, & t \in \Theta_p. \end{cases}$$

Після нескладних перетворень отримаємо, що

$$p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2-T_1)} \cdot \left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p T_p}} e^{-\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t)-s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}.$$

При відомих T_1 і T_2 і невідомих початку та протяжності завадового імпульсу оцінкою сукупності інформаційних параметрів $\vec{\lambda}$ сигналу та параметрів τ_x і τ_p завади буде вектор

$$\begin{pmatrix} \vec{\lambda} \\ \tau_x \\ \tau_p \end{pmatrix} = \underset{\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p}{\operatorname{argmax}} p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p). \quad (19)$$

Оцінювання параметрів тестового струму та побудова структурної схеми пристрою

Стосовно обмотки двигуна сигналом з оцінюваними параметрами є струм в ній. За синусоїдного струму це (20)

$$s(t, \vec{\lambda}) = I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s),$$

де кутова частота ω відома, а I_{ms} та φ_s – призначені для оцінювання величини амплітуди та початкової фази. За цієї обставини

$$p(i|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2-T_1)} \left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p T_p}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[i(t) - I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt \right\},$$

де $i(t)$ – сума сигналу та завад, яка безпосередньо спостерігається.

Звідси оцінки $\hat{\varphi}_s$ та \hat{I}_{ms} задовольняють умови відповідно $\frac{\partial p(i|\vec{\lambda})}{\partial \varphi_s} = 0$ та $\frac{\partial p(i|\vec{\lambda})}{\partial I_{ms}} = 0$, звідки

$$\hat{\varphi}_s = \operatorname{arctg} \frac{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cos \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}, \quad \hat{I}_{ms} = \frac{2}{T_2 - T_1 - T_p} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt. \quad (21)$$

Підстановка виразів (27) і (28) в (26) перетворює останній (при фіксованій N_0) в функцію величин τ_x , τ_p і N_p . Звернемо увагу на те, що величина дробу $\frac{1}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)}$ при $N_p \gg N_0$ в обчислювальному сенсі призводить до виключення області Θ_p з діапазону інтегрування (тобто до бланкування вхідного коливання) незалежно від величини N_p , оскільки в цій області $\frac{1}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} \approx 0$. А в знаменнику множника перед експонентою величина $\left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p T_p}$ при вказаному вище (23) довільному виборі $N_0 \ll N_p$ впливає на величину

максимуму функції $p(u|\hat{\lambda}, \tau_x, \tau_p)$, але не на його положення по координатах φ_s та I_{ms} . Тому величина дробу $\frac{N_p}{N_0}$ може бути довільною, але набагато більшою одиниці. Отже, після підстановки (27) та (28) в (26) залишається тільки знайти точку $(\hat{\tau}_x, \hat{\tau}_p)$ максимуму функції $p(u|\tau_x, \tau_p)$ по координатах τ_x і τ_p будь-яким з

відомих методів пошуку екстремуму. Після цього слід підставити отримані оцінки τ_x і τ_p до виразів (27) і (28) та обчислити оцінки амплітуди та початкової фази тестового струму обмотки. Структурна схема пристрою, який реалізує отриману процедуру оцінювання, наведена на рис. 2.

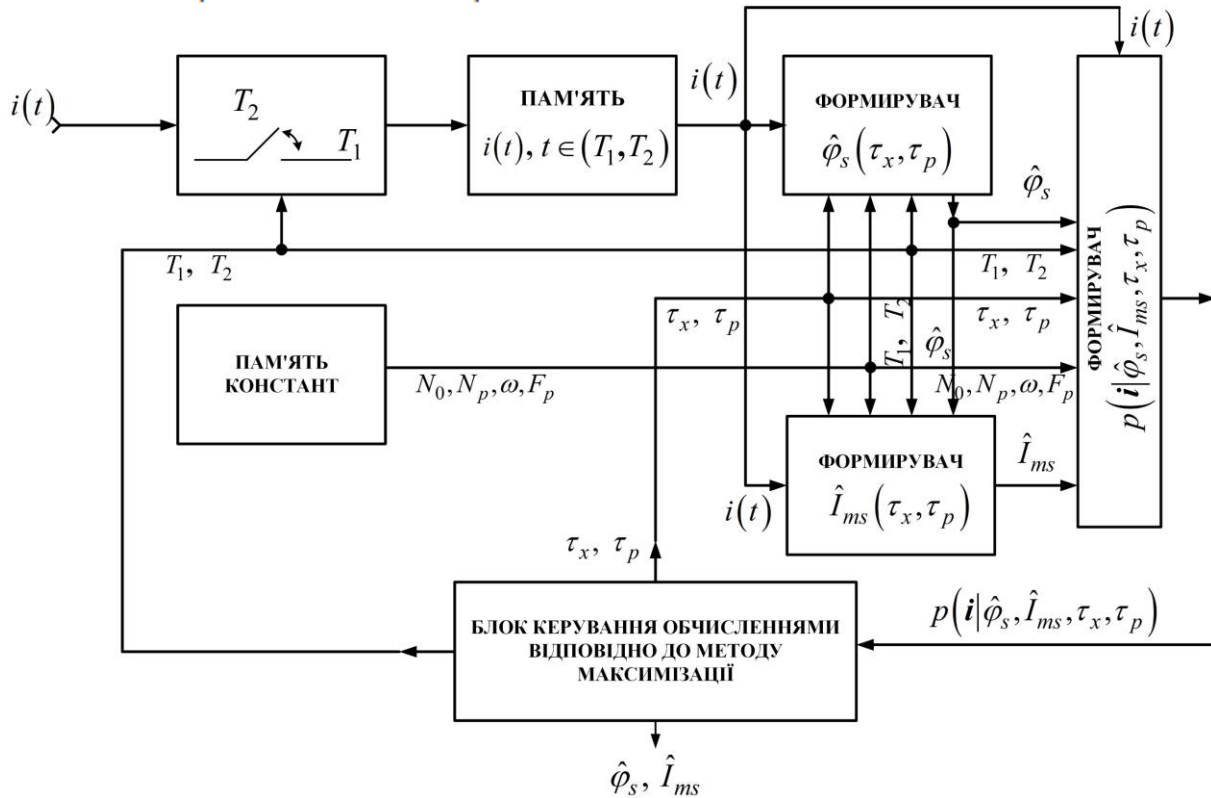


Рис. 2 Структура синтезованого пристрою та функціональне призначення його блоків допускають як апаратну, так і програмну реалізацію

Обговорення результатів синтезу пристрою оцінювання параметрів тестового сигналу

У роботі розглянуто розв’язування задач, які в широкому сенсі відносяться до загальної проблеми оцінювання параметрів структурно детермінованого сигналу на фоні завад. Досліджено досі позбутий уваги випадок, коли відсутня неперервна завада, яка діє протягом усього часового інтервалу спостереження, але присутня адитивна імпульсна завада з невідомими моментом початку та протяжністю. Така ситуація характерна для практичних вимірювань параметрів тестового струму, адитивно доданого до основного струму обмотки електродвигуна. Вдалося математично коректним способом урахувати відсутність неперервної завади і конструктивним (з точки зору синтезу пристрою) способом інтерпретувати отриману функцію правдоподібності спостереженої реалізації суміші сигналу та імпульсної завади. Це забезпечить отримання більш наближених до реальності оцінок параметрів тестового сигналу та пов’язаних з ними величин електричних параметрів обмотки, а відтак –

підвищить точність діагностування технічного стану двигуна.

Процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу сформовано у вигляді, який дає змогу застосувати широке коло доступних методів розрахунку кінцевих величин оцінок при максимізації функції правдоподібності за часовими параметрами імпульсної завади. Дослідження шляхів розв’язання останньої задачі вбачається напрямом подальших робіт.

Висновки

1. а базі статистичного описання суми структурно детермінованого сигналу та імпульсної завади, поєднаного з розвиненням спостереженого коливання в базисі ортогональних функцій отримано функцію правдоподібності вказаного коливання.

2. ля випадку, коли сигнал є синусоїдним струмом з відомою частотою, але невідомими амплітудою та початковою фазою отримано математичні вирази для оцінок двох останніх параметрів за результатами спостереження вказаного струму на фоні одиночної імпульсної завади.
3. а базі функціональних співвідношень і функціональних зв'язків, що впливають з пп. 1 і 2, побудовано структурну схему пристрою оцінювання амплітуди та початкової фази сигналу.

Список використаних джерел

1. agnetic Effects of DC Signal Injection on Induction Motors for Thermal Evaluation of Stator Windings / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58(5): 1479-1489. DOI: 10.1109/TIE.2010.2089935.
2. ptimization of HF signal injection parameters for EV applications based on sensorless IPMSM drives / L. Idkhajine, E. Monmasson, Z. Makni, P.-A. Chauvenet, B. Condamine, A. Bruyere. *IET Electric Power Applications*. Vol. 12, Issue 3. P. 347-356. URL : [https:// doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0228](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0228).
3. ignal injection method without torque ripple for stator winding temperature estimation of surface-mounted PMSM drive systems / J. Fang, S. Ding, Y. Sun, J. Hang. *Journal of Power Electronics*. November 2020. 20(6): 1504-1513. DOI:1007/s43236-020-00153-0.
4. Study of Frequency Domain Reflectometry Technique for High-Voltage Rotating Machine Winding Condition Assessment / J. Cheng, Y. Zhang, H. Yun, L. Wang, N. Taylor. *Machines*. 2023. 11 (9), 883. URL : [https:// doi.org/10.3390/machines11090883](https://doi.org/10.3390/machines11090883).
5. нацьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 28-37. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i4.296413>.
6. an Trees H. L. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. Wiley & Sons, Inc. 2001. 686 p. DOI: 10.1002/0471221082.
7. artino M., Losito R., Masi A. Analytical metrological characterization of the three-parameter sine fit algorithm. *ISA Transaction*. 2012. Vol. 51. Issue 2. Pp. 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2011.10.003>.
8. H elega D., Petri D., Dallet D. Amplitude and Phase Estimation of Real-Valued Sine-wave Via Frequency-Domain Linear Least-Squares Algorithms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. January 2018. DOI: 10.1109/TIM.2017.2785098.
9. e S., Sun J., Aboutanios E. On the Estimation of the Parameters of a Real Sinusoid in Noise. *IEEE Signal Processing Letters*. May 2017. Vol. 24. No 5. Pp. 638-642. DOI: 10.1109/LSP.2017.2684223.
10. astirde F., Akos D., Macabian C., Roturier B. Automatic gain control (AGC) as an interference assessment tool. *ION GPS/GNSS 2003*, 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Sep. 2003. Portland, United States. pp. 2042-2053. hal-01021721. <https://enac.hal.science/hal-01021721>.
11. afeev A. Suppression of Pulse Interference. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2020. 8(4). Pp. 125-130. DOI: 10.12691/aje-8-4-5.
12. oppasin Niamsuwan, Johnson J. T. Examination of a simple pulse-blanking technique for radio frequency interference mitigation. *Radio Science*. 2005. Vol. 40. RS503. Doi: 10.1029/2004RS003155, 2005.
13. evelopment of a direct penetrating signal compensator in a distributed reception channel of a surveillance radar / H. Khudov, S. Yarosh, O. Droban et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021A Vol. 2. № 9(110). Pp. 16-26. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228133>.
14. нацьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зондуючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024.

- № 2. С. 52-60. URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i2.307682>.
15. en J, Dai X., Wang N., Li H. Parameters estimation of noise amplitude modulation signal. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2017. Vol. 11, Issue 1. pp. 161-170. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0114>.
16. Suppression of Pulsed Interference through blanking / C. Hegarty, A. J. Van Dierendonck, D. Bobyn et al. *Electronic resource*. January 2000. URL: https://researchgate.net/publication/252351232_Suppression_of_Pulsed_Interference_through_blinking.

Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Synthesis of a device for estimating the parameters of a sinusoidal signal additively mixed with a single impulse interference

Abstract. The magnitudes of the electrical parameters of the stator winding of an asynchronous three-phase electric motor significantly determine its technical condition and therefore can be used for the purpose of its diagnosis. The indicated electrical parameters can be continuously monitored by introducing a small test current of known frequency into the winding, measuring its amplitude and initial phase. The accuracy of their measurement may be unacceptably low due to the presence of short pulse disturbances in the measurement information. In the work, a probabilistic mathematical description of the implementation of the sum of the signal and the impulse interference in the form of a probability function of this implementation is obtained. The expression for this function makes it possible to describe the characteristic case in which there are no disturbances at all during the time interval free from impulse interference. For the test current, which is sinusoidal with a known frequency, but unknown amplitude and initial phase, mathematical expressions for estimates of these two parameters are obtained based on the results of observing the specified current against the background of a single impulse disturbance. According to these mathematical expressions, using the probability function as a target, a structural diagram of the device for evaluating the amplitude and the initial phase of the current for testing the stator winding of a three-phase asynchronous electric motor is built. The procedure for estimating the parameters of the test signal is formed in a form that makes it possible to apply a wide range of available methods for calculating the final values of the estimates when maximizing the likelihood function based on the time parameters of the impulse disturbance.

Key words: electric motor, stator winding, test signal, impulse interference, spectral density, likelihood function.

Ананьєва Ольга Михайлівна, д.т.н., професор, кафедра автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: romashka13052015@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Бабасєв Михайло Михайлович, д.т.н., професор, завідувач кафедри, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: mmbxiit@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-8786>.

Давиденко Михайло Георгійович, к.т.н., доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: davdenk@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>.

Панченко Владислав Вадимович, к.т.н., доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: vlad_panchenko@ukr.net. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

Olha Ananieva, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: romashka13052015@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Mykhailo Babaiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: mmbxiit@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-8786>.

Mykhailo Davidenko, PhD, Associate Professor, Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: davdenk@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>.

Vladyslav Panchenko, PhD, Associate Professor, Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

ТАРАСОВ К. О., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення чинної системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями

У статті розглянуто питання підвищення ефективності швидкісних пасажирських залізничних перевезень шляхом впровадження автоматизованої технології надання альтернативних маршрутів в умовах руйнування залізничної інфраструктури внаслідок природних катаклізмів, техногенних аварій або воєнних дій. Запропонована автоматизована система дає змогу оптимізувати процес ухвалення рішень щодо альтернативних маршрутів, зменшуючи ризик людської помилки, і скоротити час затримки швидкісних пасажирських поїздів. Стаття також аналізує інтеграцію цієї системи з чинними структурами управління та автоматизованими робочими місцями поїзних диспетчерів (АРМ ДНЦ) і її вплив на підвищення загальної ефективності роботи залізничного транспорту в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: швидкісний рух, пасажирські перевезення, альтернативний маршрут, система підтримки ухвалення рішень, інформаційні технології.

Вступ

Управління є ключовим аспектом організації будь-якого процесу, спрямованого на досягнення конкретних цілей. Це включає вплив на різні фактори, які визначають стан об'єкта або процесу, забезпечуючи їхні якісні і кількісні зміни. Однією з важливих складових управління є оперативне управління, орієнтоване на короткострокові завдання і негайне реагування на зміни або проблеми. В умовах критичних ситуацій, таких як руйнування залізничної інфраструктури, оперативне управління відіграє вирішальну роль, даючи змогу швидко адаптувати систему до нових умов і забезпечити безперервний процес залізничних перевезень.

Запровадження автоматизованих технологій, які сприяють оптимізації управління в таких випадках, значно підвищує ефективність роботи залізничного транспорту, зменшуючи час простою поїздів і мінімізуючи людські помилки. Отже, сучасні підходи до управління є невід'ємною складовою успішного функціонування організацій, особливо в умовах надзвичайних ситуацій.

Постановка проблеми

Залізничний транспорт відіграє критичну роль в економічному розвитку країни, забезпечуючи перевезення вантажів і пасажирів.

Проте він вразливий до різних негативних впливів, таких як природні катаклізми, техногенні аварії, транспортні події або проведення бойових дій, що є досить актуальним у наш час. Руйнування будь-якого елемента залізничної інфраструктури може призвести до серйозних соціальних, економічних і технічних наслідків, що потребує негайного реагування та ухвалення ефективних рішень щодо оперативного відновлення та забезпечення альтернативних маршрутів в обхід зруйнованої дільниці для всіх категорій поїздів. При цьому час прямування поїзда таким маршрутом і витрати на його організацію мають бути мінімальними.

За таких умов існує необхідність розроблення ефективних методів і технологій оперативного управління залізничним транспортом, які дають змогу швидко адаптуватися до умов руйнування, забезпечити мінімальні затримки в русі поїздів і знизити економічні втрати.

Отже, постає завдання створення автоматизованої системи, яка забезпечить оптимальне управління залізничною інфраструктурою в умовах надзвичайних ситуацій з урахуванням усіх можливих ризиків і варіантів розвитку подій. Важливо також забезпечити інтеграцію цієї системи з чинною структурою управління рухом поїздів та автоматизованими робочими місцями задіяного персоналу, що дасть змогу досягти високої ефективності в реагуванні на надзвичайні ситуації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Удосконаленню швидкісних залізничних пасажирських перевезень, зокрема в надзвичайних умовах, присвячено багато робіт вітчизняних і закордонних учених. Так, у науковій праці [1] була розглянута схема оперативної взаємодії в головному та регіональних центрах управління перевезеннями з операторами перевезень на залізницях України та наведена схема орієнтованого інформаційного графа диспетчерського центра управління залізницею. У науковій статті [2] проаналізовано впроваджену АС «Надзвичайна ситуація» і запропоновано структуру її взаємодії з АСК ВП УЗ Є для організації перевізного процесу в разі виникнення нестандартних ситуацій у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР). Авторами наукової роботи [3] задля підвищення надійності функціонування системи швидкісних залізничних пасажирських перевезень в умовах воєнного стану в Україні запропоновано процедуру надання альтернативного маршруту швидкісним поїздам на напрямку перевезень.

Не є виключенням і роботи закордонних вчених, наприклад, у роботі [4] було розроблено програмну структуру, що поєднує алгоритми моніторингу стану залізничного руху, прогнозування, виявлення та вирішення конфліктів на маршрутах під час незапланованих порушень роботи залізничного транспорту, а в роботі [5] авторами запропоновано методичну процедуру надання альтернативних маршрутів при проведенні планових ремонтів із закриттям залізничної дільниці для чеського оператора залізниць.

Отже, як бачимо з наведеного аналізу, удосконаленню швидкісних залізничних пасажирських перевезень, а також розробленню автоматизованих технологій, які дають змогу оперативно реагувати на надзвичайні ситуації, з метою підвищення надійності та ефективності роботи залізничного транспорту, присвячено багато досліджень, і тема дослідження є актуальною.

Мета дослідження

Удосконалення чинної системи оперативного управління для швидкісних залізничних пасажирських перевезень у разі руйнування залізничної інфраструктури

Викладення основного матеріалу дослідження

Якщо трохи зануритися в термінологію, то саме слово управління слід розуміти як вплив цілеспрямованих дій на об'єкт або процес, що

призводить до якісної і кількісної зміни факторів, які визначають стан об'єкта або процесу, в результаті чого можна досягти конкретної мети. До основних функцій управління можна віднести планування, облік, оперативне управління та контроль за визначеними процесами [6]. Зазвичай управління спрямоване на довгострокове планування, визначення стратегічних цілей і загальних напрямів розвитку організації або процесу, воно охоплює всі рівні і аспекти діяльності – від стратегічного планування до забезпечення ресурсами.

У випадках, коли необхідно сфокусуватися на конкретних оперативних завданнях, часто на нижчому рівні управління, орієнтованому на короткострокові періоди, потрібно організувати негайне реагування на зміни або проблеми, що виникли, тоді застосовують оперативне управління (ОУ).

Оперативне управління (ОУ) являє собою одну з основних функцій управління виробництвом, що полягає в інтервальному розробленні оперативних планів і постійній організації контролю і регулювання їх виконання. Основною складовою ОУ є диспетчерське керівництво, систематичний облік і контроль за ходом виконання оперативних планів і регулювання ходу виробництва [6].

Як уже було зазначено, альтернативний маршрут – це резервний шлях, який використовують для продовження поїздок в обхід зруйнованих ділянок чи станцій. Формування альтернативних маршрутів для швидкісних пасажирських поїздів у разі руйнування залізничної інфраструктури є одним із найяскравіших прикладів, коли необхідне саме оперативне управління. У цьому випадку найбільший рівень відповідальності за організацію руху поїздів на себе беруть диспетчерський апарат філії «УЗШК» і виробничі підрозділи «Служби роботи станцій» (Д) і «Центр управління рухом поїздів» (ЦУР) у межах тих регіональних філій, де відбулося руйнування або які будуть задіяні при формуванні альтернативного маршруту.

Загалом мережа українських залізниць складається з шести регіональних філій, поділених на регіони, а кожен регіон – на окремі диспетчерські дільниці. Наприклад, регіональна філія «Південно-Західна залізниця», яка має один із найвищих показників інтенсивності руху поїздів на території України, поділяється на п'ять регіонів (Київський, Козятинський, Жмеринський (рис. 1), Коростенський і Конотопський і 23 диспетчерські дільниці.

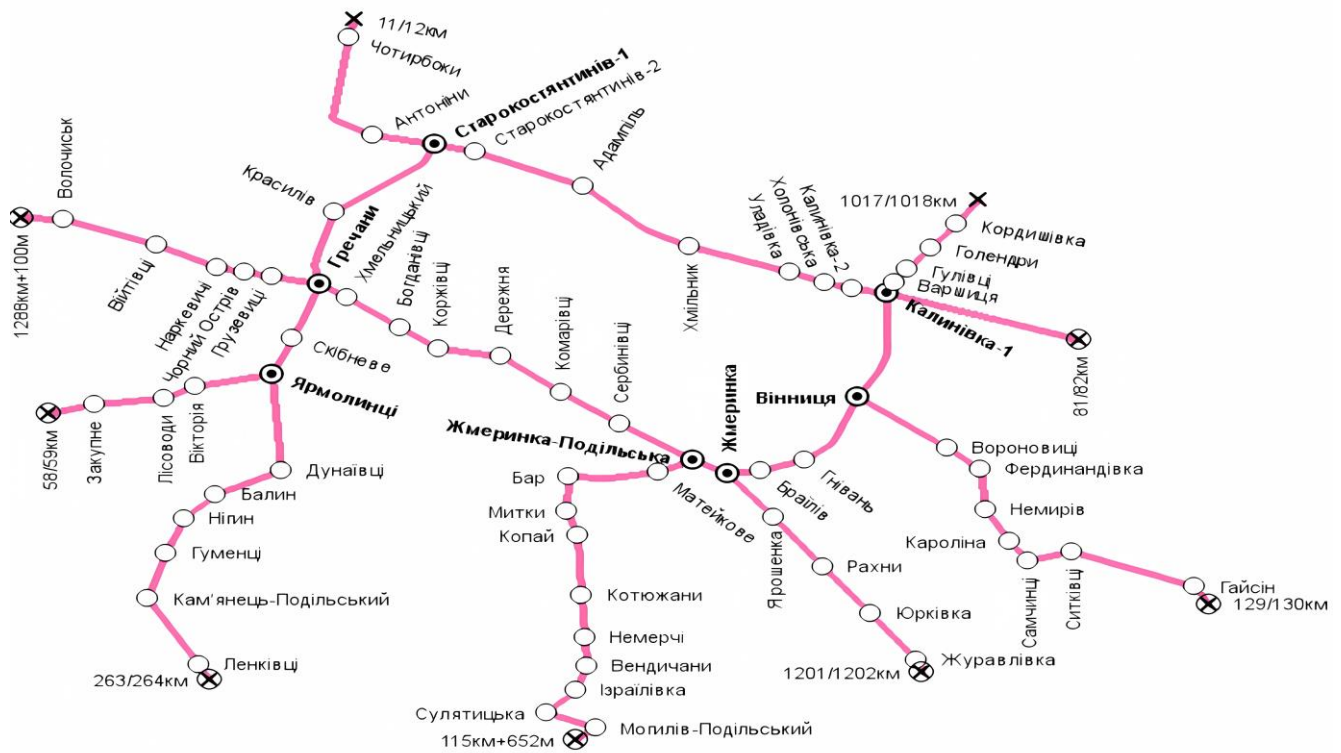


Рис. 1. Схема Жмеринського регіону регіональної філії «Південно-Західна залізниця»

Кожен із підрозділів має свою мету і завдання. Так, метою ЦУР є задоволення потреб перевезення пасажирів, вантажів, зокрема небезпечних вантажів, багажу, вантажобагажу і пошти залізничним транспортом у внутрішньому та міжнародному сполученнях. Цієї мети досягають за рахунок вирішення таких завдань, як організація управління процесом перевезень, регулювання напрямку вагонопотоків і забезпечення безперервності перевізного процесу, вирішення питань ефективного використання рухомого складу на регіонах залізничних перевезень, управління та контроль розроблення графіка руху поїздів, порядку напрямків вагонопотоків і формування їх у поїзди згідно з планом формування поїздів залізничними станціями.

На мережі українських залізниць існує п'ять ЦУР, розташованих у Києві, Харкові, Львові, Дніпрі та Одесі, кожен із яких підпорядкований безпосередньо «Департаменту управління рухом» у місті Києві. Аналогічно «Департаменту управління рухом» підпорядкований і диспетчер УЗШК. Основним працівником у межах ЦУР, який одноосібно керує рухом поїздів на заданій дільниці, є поїзний диспетчер (ДНЦ), до обов'язків якого належить:

- активне використання технічних засобів для забезпечення необхідних обсягів руху, зменшення

часу обробки поїздів на станціях, а також ефективного використання вагонного парку, локомотивів і забезпечення пропускної спроможності;

- контролювання діяльності станцій і вживання заходів для виконання завдань із формування та відправлення поїздів за графіком руху і планом формування поїздів;

- своєчасне надання вказівок щодо руху поїздів черговим по станціях, а в разі потреби – машиністам локомотивів і складачам поїздів;

- спостереження за процесами приймання та відправлення поїздів на станціях, особливо у випадках збоїв у роботі систем СЦБ і зв'язку, під час обгонів і схрещень довгих, великовагових поїздів, поїздів із небезпечними чи негабаритними вантажами, а також вживання заходів для убезпечення і своєчасного руху поїздів.

«Служба роботи станцій» у свою чергу забезпечує своєчасне та якісне перевезення пасажирів, вантажів, багажу та пошти, гарантуючи безпеку руху поїздів і збереження вантажу; організовує рух поїздів за графіком, аналізує ринок транспортних послуг, розробляє та погоджує з відповідними службами довгострокові плани розвитку транспортного обслуговування, інфраструктури та рухомого складу; забезпечує розвиток і зміцнення матеріально-технічної бази певного регіону, захист навколишнього середовища,

готовність технічних підрозділів до надзвичайних ситуацій, а також керує ліквідацією їхніх наслідків; визначає обсяги перевезень вантажів для підрозділів регіону відповідно до затверджених планів, доводить їм норми забезпечення рухомим складом, контролює виконання планів перевезень пасажирів і вантажів, а також забезпечує впровадження єдиної науково-технічної та інвестиційної політики для підвищення технічного рівня виробництва, удосконалення технологічних процесів і застосування світового досвіду. Організаційна структура виробничого підрозділу «Служба роботи станцій» подана на рис. 2.

У разі виникнення нестандартних ситуацій саме регіональний відділ роботи станцій (ДРС), взаємодіючи з іншими структурами, забезпечує оперативне управління технічними засобами регіону (пожежні або відбудовні поїзди, автомобільний транспорт тощо) і підготовку захисних споруд і спеціальних об'єктів до роботи в екстремальних умовах.

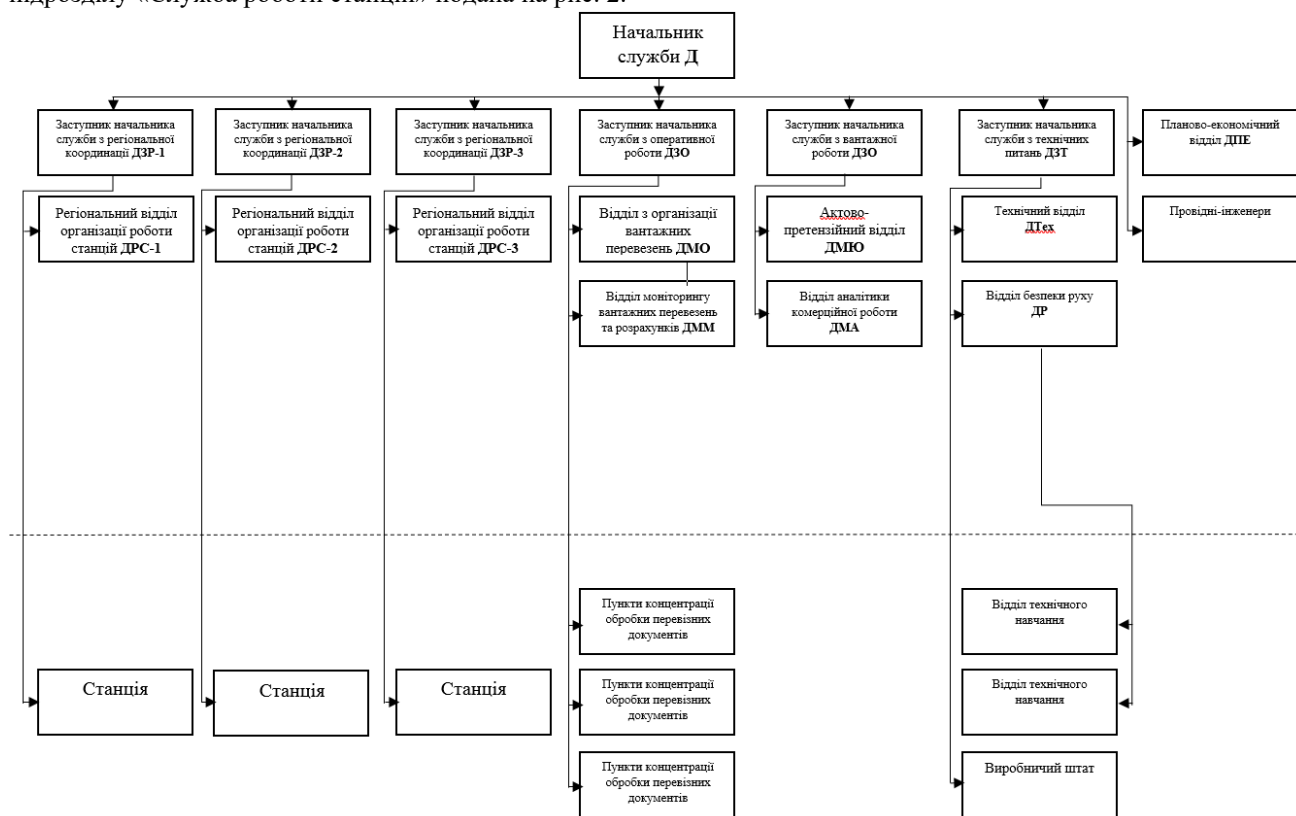


Рис. 2. Організаційна структура виробничого підрозділу «Служба роботи станцій»

Загалом руйнування залізничної інфраструктури можливе через такий ряд причин: природні катаклізми, техногенні катастрофи, транспортні події або проведення воєнних бойових дій. Також можливі варіанти комбінування декількох причин, наприклад підриг Каховської ГЕС 6 липня 2023 року, внаслідок чого стався швидкий відтік води, у результаті якого відбувся сильний зсув земляного полотна на дільниці Кривий-Ріг – Нікополь і закриття цієї дільниці на декілька діб [7].

Кожне руйнування інфраструктури, задля підвищення рівня надійності системи, якості обслуговування пасажирів і зменшення величини економічних витрат, незалежно від вищевказаних причин потребує оперативного управління та швидкої адаптації системи до новостворених умов.

У реальних умовах після руйнування залізничної інфраструктури взаємодія між працівниками, відповідальними за організацію руху поїздів, виглядає так, як показано на рис. 3.

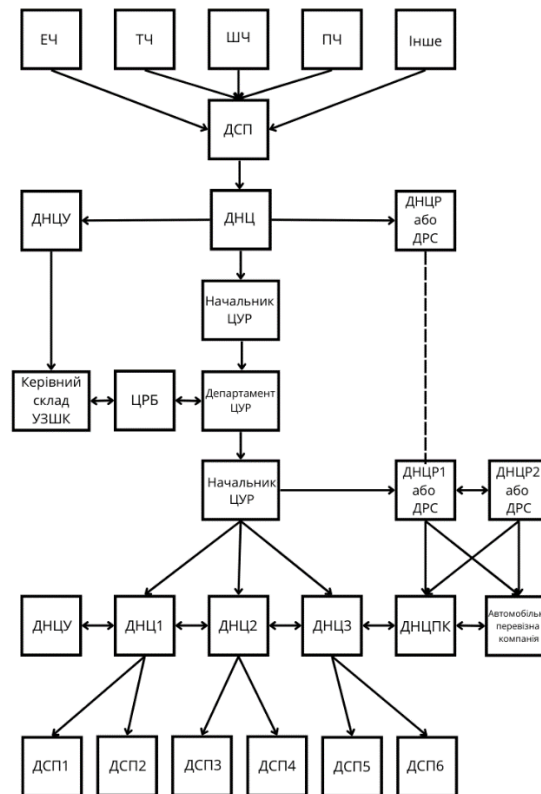


Рис. 3. Схема взаємодії працівників «Служби роботи станцій», ЦУР та УЗШК при руйнуванні залізничної інфраструктури

Першим, хто дізнається про руйнування певного елемента залізничної інфраструктури, може бути як працівник залізниці (представники локомотивного господарства (ТЧ), колійного господарства (ПЧ), електропостачання (ЕЧ), дистанції зв'язку (ШЧ) та ін.), так і певна стороння особа (пасажир, випадковий перехожий тощо). Після цього вхідну інформацію про руйнування певної ділянки інфраструктури передають черговому найближчій станції (ДСП). Отримавши інформацію про руйнування залізничної інфраструктури та її поточний стан, черговий по станції передає поїзному диспетчеру цієї ділянки (ДНЦ). Поїзний диспетчер, отримавши інформацію про задане руйнування залізничної інфраструктури (нестандартну ситуацію) передає її черговому по відділенню (ДНЦР, раніше ДГП) або начальнику регіонального відділу організації роботи станцій (ДРС), керівнику центру управління рухом поїздів (ЦУР), у межах управління якого сталося руйнування інфраструктури, і диспетчеру філії УЗШК (ДНЦУ). ДНЦУ, отримавши вхідну інформацію про руйнування залізничної інфраструктури від ДНЦ, узгоджує порядок подальших дій із власним керівним складом. Начальник ЦУР, отримавши інформацію про руйнування залізничної інфраструктури, передає її в

Департамент ЦУР. Після цього департамент проводить оперативну нараду разом із ревізорським апаратом (ЦРБ) і керівним складом філії УЗШК, де ухвалюють рішення про подальше прямування швидкісного поїзда.

Після ухвалення рішення департамент ЦУР передає його знов начальнику ЦУР, а він залежно від вибраного альтернативного маршруту швидкісного пасажирського поїзда передає вже інформацію тим ДНЦ, ДНЦР або ДРС, ділянки та регіони яких мають бути задіяні.

Якщо ухвалене рішення передбачає використання додаткового поїзда-шатла, то ДРС або ДНЦР додатково зв'язується з диспетчером пасажирської компанії ДНЦПК щодо виділення додаткових пасажирських вагонів для подальшого транспортування пасажирів і поїзними диспетчерами щодо знаходження та виділення додаткового локомотива та локомотивної бригади для створення «поїзда-шатла».

Якщо потрібне залучення автомобільного транспорту, то ДРС або ДНЦР зв'язується з певним виробничим підрозділом, який знаходиться найближче до місця руйнування залізничної інфраструктури та має на своєму балансі автобуси, або найближчим приватним перевізником із вимогою

надати декілька автобусів для подальшого транспортування пасажирів. Після цього всю інформацію, що надійшла, надають поїзним диспетчерам нових задіяних дільниць, а від них – черговим по станціях. Поїзні диспетчери разом із черговими по станціях повинні забезпечити безпечне пропускання альтернативним маршрутом поїзда УЗШК, надаючи йому при цьому найбільшу пріоритетність.

Слід також зазначити, що схема взаємодії працівників, подана на рис. 3, актуальна лише для тих випадків, коли після руйнування залізничної інфраструктури дільницю закривають повністю. У випадку, коли руйнування інфраструктури дає змогу рухатися поїзду дільницею власним ходом неправильною колією або з використанням тепловоза, процес організації подальшого руху значно простіше – без залучення ЦРБ і департаменту ЦУР. Тому в статті сформована автоматизована система надання альтернативних маршрутів для цих випадків не надана.

Проте такий чинний підхід щодо організації руху швидкісного поїзда через велику кількість залучених працівників може займати багато часу, який безпосередньо збільшує величину простою пасажирського поїзда, а отже, і величину додаткових витрат. Для того щоб зменшити величину простою і витрат, впровадження запропонованої

| | | | |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| <u>T_ic+</u> | <u>T_sttl_tep</u> | <u>T_sttl_tep</u> | <u>T_auto</u> |

- Прямування швидкісного поїзда власною тягою
- Прямування «поїздом – шаттлом» із залученням тепловозу
- Прямування «поїздом – шаттлом» із залученням електровозу
- Прямування автобусом

Рис. 4. Кодування видів тяги в бінарному вигляді

Після цього залежно від заданого маршруту прямування швидкісного поїзда створюють початкову популяцію. Далі вказують ділянку маршруту, на якій відбулося руйнування залізничної інфраструктури. Цю ділянку виключають із загальної системи та розпочинають операцію схрещення, за якої система

автоматизованої технології надання альтернативного маршруту рекомендовано проводити на основі оптимізаційної моделі, сформованої в роботі [8].

Основна мета цієї моделі – знаходження альтернативного маршруту для швидкісного пасажирського поїзда в разі руйнування залізничної інфраструктури залежно від його місцезнаходження, кінцевих і проміжних станцій посадки та висадки пасажирів, а також їх кількості. Окрім того, при побудові альтернативного маршруту моделлю передбачено не лише зміну основного маршруту, а й використання «поїзда-шатла» або автобуса. Оптимальне рішення знаходять на основі апарату генетичних алгоритмів.

Кожен індивід (маршрут) подано як послідовність, де кожен елемент відповідає ділянці маршруту. Значення цього елемента на кожній ділянці може набувати одного з трьох значень: «Поїзд Intercity + (T_ic+)», «Поїзд-шатл (T_sttl)» або «Автобус (T_auto)». У свою чергу поїзд-шатл може набувати двох значень залежно від задіяного виду тяги: «тепловозний» (T_sttl_tep) або «електровозний» (T_sttl_el). У бінарному вигляді це виглядає так, як показано на рис. 4.

почергово, для кожної дільниці, підбирає найкращий варіант щодо виду подальшої тяги (рис. 5). Потім відбувається процес мутації, а отриманий альтернативний маршрут перевіряють на умову мінімуму витрат. Якщо умова виконана, то остаточний результат виводять на монітор.

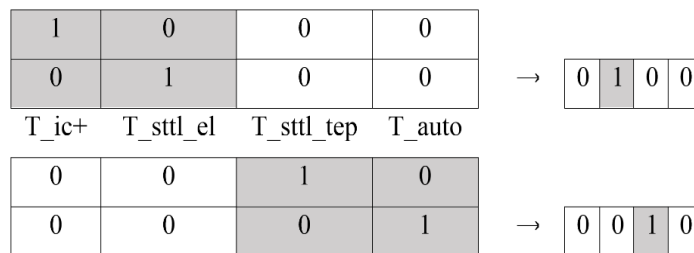


Рис. 5. Процес схрещення елементів ГА

Створений програмний продукт у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР) рекомендовано встановити на автоматизовані робочі місця поїзних диспетчерів (АРМ ДНЦ) і диспетчера

філії УЗШК. Схема взаємодії працівників «Служби роботи станцій», ЦУР та УЗШК при руйнуванні залізничної інфраструктури після впровадження автоматизованої технології показана на рис. 6.

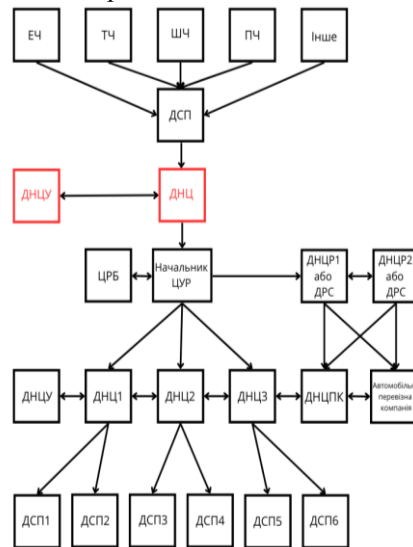


Рис. 6. Схема взаємодії працівників «Служби роботи станцій», ЦУР та УЗШК при руйнуванні залізничної інфраструктури після впровадження автоматизованої технології

Впровадження запропонованої автоматизованої технології дасть змогу відмовитися від проведення оперативних нарад на рівні департаменту ЦУР і ухвалити рішення на рівні ДНЦ і начальника ЦУР. Такий підхід не лише пришвидшить ухвалення оперативного рішення стосовно подальшого руху заданого поїзду, а й зменшить вірогідність людської помилки при цьому.

Висновки

Отже, руйнування залізничної інфраструктури є серйозною проблемою, що має значні соціальні, технічні та економічні наслідки. Незалежно від причини руйнування інфраструктури завжди існує необхідність своєчасного реагування та адаптації системи для зменшення негативних наслідків. Запропонована автоматизована технологія надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам дасть змогу суттєво скоротити час простою в очікуванні рішення, зменшити вірогідність людської помилки та знайти оптимальне рішення, що підвищить ефективність роботи залізничної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій.

Список використаних джерел

- Кулешов В. В., Дочія К. В., Оробченко С. А. Удосконалення диспетчерського управління регіональними центрами залізниць в умовах інформатизації. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 145. С. 17-23.
- Гайдук Д. А., Бутько Т. В. Удосконалення автоматизованої системи «Надзвичайна ситуація» у взаємодії з АСК ВП УЗ Є для керування рухом поїздів із використанням системи підтримки прийняття рішень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 2. С. 3–6.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307509> (дата звернення 25.08.2024).
- Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту / Т. В. Бутько та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 31–37.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276341> (дата звернення 13.08.2024).

4. The ON-TIME real-time railway traffic management framework: A proof-of-concept using a scalable standardised data communication architecture / E. Quaglietta et al. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 63. P. 23–50. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.11.014> (date of access 27.08.2024).
5. Bulková Z., Gašparík J., Zitrický V. The Management of Railway Operations during the Planned Interruption of Railway Infrastructure. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9, no. 7. P. 119. URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9070119> (date of access 27.08.2024).
6. Козаченко Д. М., Коробйова Р. Г., Левицький І. Ю., Лашков О. В. Експлуатаційна робота залізничних станцій: приклади та задачі / ДІПТ ім. академіка Лазаряна. Дніпропетровськ: ПФ «Стандарт-Сервіс». 2014. 108 с. ISBN 978-966-97463-0-6.
7. Під Нікополем через підрив Каховської ГЕС просіла залізнична колія. *espresso.tv*. URL: <https://espresso.tv/pid-nikopolem-cherez-pidrив-kakhovskoi-ges-prosila-zaliznichna-koliya> (дата звернення 29.08.2024).
8. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 03003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003003>.

Tarasov K. O. Improvement of the existing system of operational management of high-speed railway passenger transportation by introducing automated technology for providing alternative routes

Abstract. The article examines the issue of increasing the efficiency of logistics of high-speed passenger trains through the introduction of automated technology for providing alternative routes, in the conditions of the destruction of the railway infrastructure, which may occur as a result of natural disasters, man-made accidents or military actions. The proposed automated system makes it possible to optimize the decision-making process regarding alternative routes, reducing the risk of human error and reducing the delay time of high-speed passenger trains. The article also analyzes the integration of this system with existing management structures and automated workplaces of train dispatchers (ARM DNC) and its impact on improving the overall efficiency of railway transport in emergency situations.

Keywords: high-speed traffic, passenger transportation, alternative route, decision support system, information technologies.

Tarasov Kirilo Oleksandrovich, aspirant кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5976-4169>.

Tarasov Kyrylo Oleksandrovych, graduate student of the department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5976-4169>.

Oles HAIDENKO, PhD
(Kyiv Electromechanical Professional Pre-Higher College)
Halyna HOLUB, PhD, Associate Professor
Ivan KUIBOVSKYI, PhD, Associate Professor
(State University of Infrastructure and Technologies)

A hierarchical model of the information environment for railway power supply system critical objects control

Abstract. *It is proposed to consider the hierarchical model of the information environment as a structure according to its functions (implemented by the software part) and architecture (responsible for effective implementation of functional capabilities). It is proposed to improve the information management system of Ukrzaliznytsia's critical power supply facilities, based on the developed hierarchical model of the information environment, which takes into account the presence of Ukrzaliznytsia's own generation sources by integrating the appropriate control subsystem into the information system structure. The model emphasizes the integration of software and hardware components for data collection, pre-processing, and decision-making, contributing to a highly automated and intelligent control system. It proposes a multi-level structure incorporating artificial intelligence and advanced technologies to optimize electricity consumption and improve operational efficiency within the railway power supply system.*

Key words: *hierarchical model, control, power supply, information, railway.*

Problem statement

Information plays a key role in ensuring effective management of objects of the railway power supply system.

The development of a hierarchical model of the information environment for railway power supply system critical objects control is an urgent scientific and technical task, which will allow to increase the effectiveness of management decisions by integrating different levels of information and ensuring its timely analysis in a single information environment. The importance of this problem is due to the complexity of power supply facilities, the need for prompt response to emergency situations, and the criticality of the consequences of possible system failures, the probability of which only increases due to the destruction of Ukrainian power plants by the Russian Federation.

As one of the largest consumers in Ukraine, Ukrzaliznytsia experiences a significant shortage of electrical energy, and the introduced consumption limits cover only 75% of the real needs to ensure the transportation process and current economic activity [1] of the company.

An increase in the deficit will have an impact on the smooth running of trains. The construction of gas power plants for the needs of Ukrzaliznytsia [1] created the need to rethink the information environment of the power supply system management,

since previously the generation factor was not taken into account in the development of information systems for the power supply of railway transport in Ukraine.

Literature review

If we set aside the subject area, the task of developing a model of the control information environment is common to the automation industry as a whole, so experience from other areas is taken into account to analyze the typical features of hierarchical models of information systems, not limited to research in the field of power supply, including the power supply of railway transport. For example, in the article [2], the author describes a hierarchical model of intelligent control in the military sphere through graph theory, while using the principles of automatic control theory.

The authors of the article [3] consider a three-level hierarchical system of monitoring and dispatching for the execution of business processes, which is similar in structure to the desired model of the information environment for railway power supply system critical objects control.

The method of forming information support is proposed in [4].

It is designed for a hierarchical network representation of a subject area and can be used for a decision support system for acquiring and applying knowledges.

Information networks of the electric power industry all over the world began to develop according to the concept, which is generally called Smart Grid [5]. It certainly cannot be ignored when developing a model of the information environment for controlling the power supply system of railway transport. Researches [6, 7] confirm the relevance of “intelligent” power grids of the Smart Grid concept in 2024.

A large number of scientific works are devoted to the intellectualization of the electric power industry in Ukraine [8-12].

The basic principles of monitoring as a fundamental component of “smart” electricity supply networks in Ukraine are laid down in work [8].

The relevance of modern information technologies for energy in the post-war reconstruction of Ukraine is confirmed in [9].

The need to increase the efficiency of the use of modern computer technologies in the field of energy is substantiated in the work [11]. Also, the work [11] reveals the essence of promising areas of application of artificial intelligence in energy, such as forecasting energy demand, optimization of energy consumption, use of “smart” networks.

In the information environment model for railway power supply system critical objects control, it is necessary to take into account the tendency to organize microgrids on the basis of existing distribution electrical networks with local energy sources, studied in [12] as one of the ways to reduce the military impact on the power system.

The aim of the work

The purpose of the study is to develop a hierarchical model of the information environment for railway power supply system critical objects control, which will take

into account the presence of Ukrzaliznytsia’s own generation sources.

Main part

The performance of the information system for managing complex dynamic objects largely depends on the availability of a complex of software and hardware tools that provide data collection and pre-processing. Therefore, it is worth considering the hierarchical model of the information environment as a structure based on its functions, which are implemented by the software part, and the architecture that is responsible for the effective provision of their implementation.

The railway power supply network is a complex and widely dispersed control object. This determines the complex structure of the hierarchical model of the information environment with controlled systems. The complex structure accumulates a high level of automation not only of the processes of preparing information for decision-making, but also of the processes of producing decision options, which are based on the knowledge obtained by the information system.

Taking this into account and taking into account the current trends in the development of information technologies in the energy sector and the level of their integration in the information environment for railway power supply system critical objects control in Ukraine, it is proposed to carry out its formation according to the structure (fig. 1), which provides for increasing the functionality of the current management system in order to reduce the cost of purchasing electricity by optimizing the transportation process and effectively using own generation sources. The proposed structure of the information environment (fig. 1) consists of several complex subsystems, each of which performs its specific tasks.

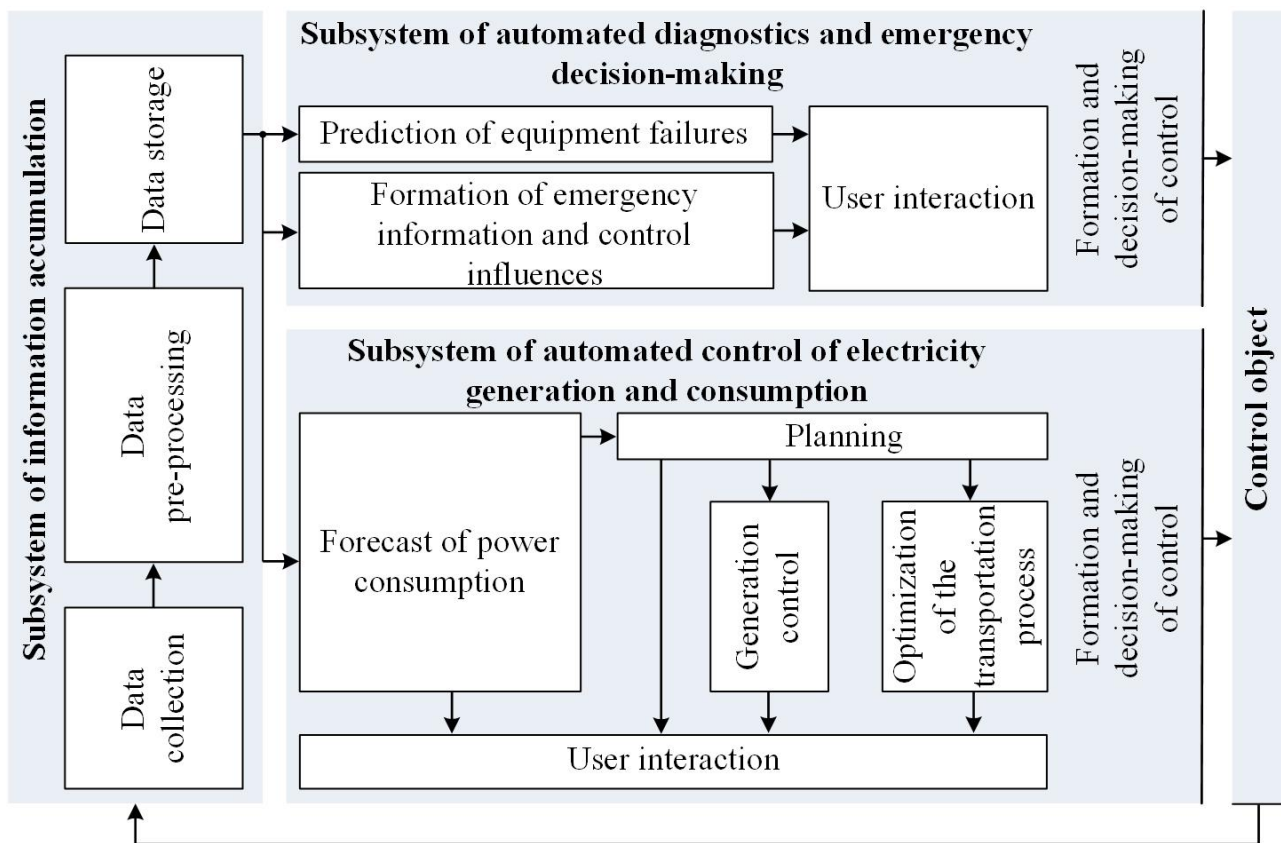


Figure 1. The structure of the information environment for railway power supply system critical objects control

The subsystem of information accumulation includes both software components of data processing for the purpose of obtaining knowledge, and physical devices for registration, storage and transmission of primary monitoring data to other subsystems. This subsystem provides for the integration of data from external sources to ensure the intellectualization of the control system in accordance with modern needs and technologies. Further, these data can be used to solve specific tasks of control. This subsystem most closely depends on the computer architecture of the information environment.

The subsystem of automated diagnostics and emergency decision-making is aimed at reducing the influence of the operative personnel human factor during the elimination of abnormal (emergency) situations in the power supply network, which corresponds to the Smart Grid concept. This subsystem consists of a prediction equipment failures unit and a formation of emergency information and control influences unit. The prediction equipment failures unit determines the remaining resource of power devices. The formation of emergency information and control influences unit informs the dispatcher about abnormal situations, provides data on the current mode of operation and offers possible ways to eliminate accidents in case the dispatcher's intervention is necessary. Thus, through the user interaction unit, the formation of emergency information and control influences unit performs the functions of a support and decision-making system.

A modern decision support system allows predicting the impact of decisions on the further development of the control object [13].

If it is possible to eliminate the consequences of an emergency situation without the involvement of operative personnel, the subsystem of automated diagnostics and emergency decision-making should independently eliminate them with the help of intelligent algorithms.

The subsystem of automated control of electricity generation and consumption consists of interconnected units – forecasting and planning. They prepare the input information for the generation control and optimization of the transportation process units. All units of the subsystem interact directly with the dispatcher and provide data in the form of prepared reports and decisions.

Based on the data from the subsystem of information accumulation, the forecast of power consumption unit is designed to forecast the value of power consumption at individual traction substations and at individual feeders, if it is technically possible. The predicted values are transferred to the planning unit and reported to the user interaction unit.

The main purpose of the planning unit is to save costs for the purchase of electricity. It is achieved by analysing the available electricity tariffs and the current train schedule, using the obtained forecast values.

Generation control and optimization of the transportation process units are necessary according to

the needs determined by the planning unit in order to use own sources of generation in an automated mode in cases of electricity shortage in the country's power system or on the condition that the cost price of electricity of own production is lower than the price of the wholesale energy market and for adaptation of the train schedule [14-16] to the current tariff conditions.

The task of the subsystem of automated control of electricity generation and consumption is also the automatic formation of annual, quarterly and monthly electricity balances for separate control objects (it can be a traction substation, its separate feeder or even a separate workshop or any other stationary consumer that is powered by this feeder and has its own automated accounting devices (automated system of commercial electricity accounting). These balances can be used to analyze the use of electricity, its losses, and determine ways to save. Planning, generation control and optimization of the transportation process units provide the formed control influences to the dispatcher for their further approval, correction or transfer to other structural divisions of Ukrzaliznytsia.

The information environment for control objects of the electric power system is a structure with a complex topology of connections between its elements [17]. In the power industry, workstations of monitoring systems mostly interact through local servers, which makes it expedient to optimize the network, in particular, to segment it by workgroups so that the main volume of traffic remains within the local segment [8]. At the same time, the communication infrastructure should use all available paths and ensure data transmission via the shortest routes [18].

The main architectural feature that distinguishes the information environment of an intelligent control system from others is the connection of data storage and processing mechanisms necessary in conditions of dynamic changes in input data or their uncertainty under the influence of external factors (changes in the parameters of the external environment, tasks, characteristics of the control object etc).

The proposed hierarchical model of the information environment for railway power supply system critical objects control involves the use of artificial intelligence methods and technologies, which were studied in works [19-21], as the main tools for dealing with the uncertainty of external influence. It can be the basis for expanding the automated control system at critical traction power supply facilities of Ukrzaliznytsia with the aim of introducing additional functionality and rationalizing the use of technical means.

The hierarchical multi-level structure has the following essential characteristics: possibility of vertical decomposition of the system into subsystems; priority of actions or possibility of upper-level subsystems intervention; upper-level subsystems actions dependence from actual performance of their functions by the lower levels [3].

The hierarchical model of the information environment architecture for Ukrzaliznytsia's power supply system critical objects control (fig. 2) provides decentralized information processing, which makes it possible to transfer the load to the lower levels of the hierarchy. This approach makes it possible to implement local automated control and diagnostics based on servers of power supply distances.

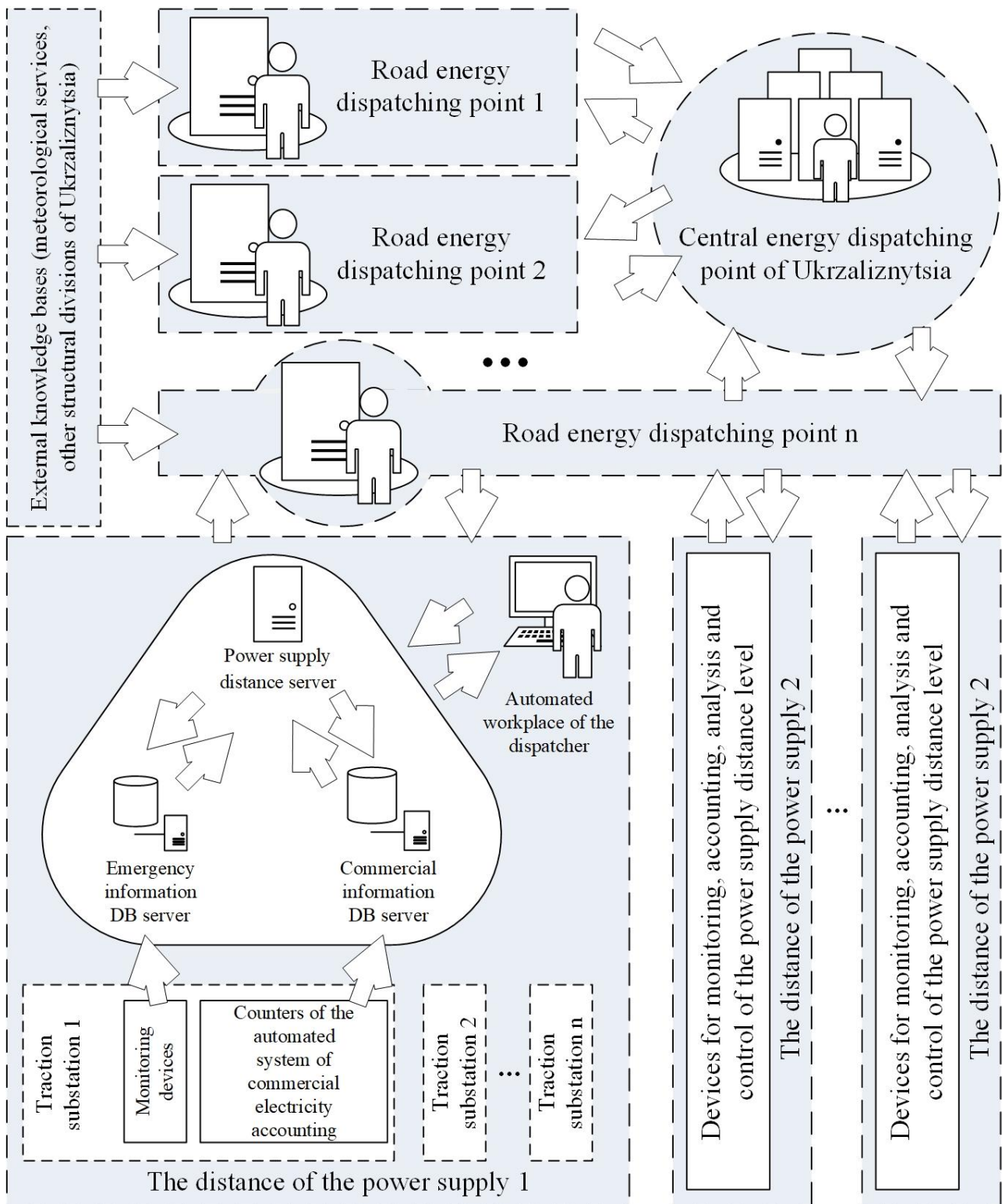


Figure 2. Hierarchical architecture of the information environment for railway power supply system critical objects control

According to the concept of Smart Grid [5, 19], one of the key elements of an “intelligent” network is a digital substation, which is equipped with control, protection, and management systems that collect and process the

entire volume of data about the state of the power grid and manage the equipment in a digital format.

Collected primary data is archived and stored in raw form for the prescribed period in accordance with regulatory documents.

The railway industry is both a producer of data and a consumer of knowledge derived from datasets [23]. The model (fig. 2), which contributes to the effective transformation of large volumes of data into useful information and knowledge necessary for the optimization of railway transport operations, is proposed using the ideas of building industrial information systems described in the book [24] by Thomas Bushe and Ali Yalchin and taking into account that the lower levels of the architecture are not only the main sources of information, but also its biggest consumers. The most intensive data transfer occurs at the lower levels.

Thus, a significant part of the information channels is placed in the relevant subsystems, and this saves traffic and computing resources at the upper levels of the hierarchy [24].

Data transfer protocols must ensure reliable and correct operation. Therefore, it is necessary to use the Ethernet protocol and the TCP/IP model for data transmission in a local network. They are widely used by leading manufacturers of computer equipment, in particular hardware of automated control and monitoring systems [8, 25]. This is due to their well-developed technology, low cost and wide distribution.

The combination of intelligent communication protocols with energy transfer in the general architecture provides the possibility of implementing distributed management [26]. For this, the principle of a single system-wide measurement of the railway power industry primary data is important. It is key to obtaining information that shows the excited modes of the power supply system operation as a territorially distributed complex structure and allows timely response to external influences and minimizing damages, quickly returning the system to normal functioning.

According to the four-level hierarchy of the proposed architecture, the data access levels necessary to protect information from unauthorized access must be provided in the information system.

Microprocessor devices and components of the monitoring and diagnostics network form the lower level of the hierarchical control model of the Ukrzaliznytsia's power supply system (fig. 2). Traction substation level functionally provides technological control of objects and processes on the contact network and traction substation.

Means for recording primary data, located at the lower level, serve as the basis for the intellectualization of power supply. With their help, the tasks of commercial and technological electricity accounting and continuous equipment diagnostics are automatically solved. Continuous diagnostics of the equipment consists in determining the type and location of the accident and recording pre-accident, emergency and post-accident power supply modes with time synchronization and activation of protection systems. Information from this level is transmitted to all higher levels of the hierarchy.

Each of the railways has several power supplies distances (power supply distance level), where operational control and monitoring functions are

performed, primary data is collected from microprocessor recorders of traction substations, operational dispatching organizational and technological control of the power supply distance is carried out.

Distributed databases (DB) of emergency and commercial information are implemented on separate servers of the power supply distance level (fig. 2) and the information is formed for transmission to a higher level.

One of the reasons for such an architectural solution is the use of the computer network "multi-user" operation mode, which causes many interrelated issues regarding the protection of information on servers.

The developed model of the information environment facilitates the separation of access, since emergency and commercial information are processed independently on separate devices. This reduces the risk of data leakage or loss.

In this process, algorithms are implemented that provide management functions in accordance with the Smart Grid concept: modeling and forecasting the reliability of the electric energy transmission and consumption systems operation, assessment of equipment condition, formation of management decisions.

Information from power supply distances and external sources (for example, meteorological services) is sent to the road energy dispatching point and subject to further processing. Operational dispatching organizational, economic and technical management of the railway power supply service is carried out at the road energy dispatching point level.

The central energy dispatching point of Ukrzaliznytsia is the highest control level. All information from the six regional branches of Ukrzaliznytsia comes here. Coordination of management actions, which ensures coordinated and effective functioning of the entire power supply system, is carried out at this level.

Preparation of information for organizational and economic management and creation of reports of the appropriate level is carried out at the highest levels of the hierarchical model.

Effective organizational and economic management, as well as energy efficiency, are achieved due to increasing the awareness of management personnel and the possibility of applying various computational methods in the processes of forming management decisions.

Organizational and technological management ensures a reduction in electricity consumption due to the use of traction power supply economic modes, ensuring an energy-optimal train schedule, intellectualization of the processes of electricity payment tariff system effective use, as well as timely provision and increase of information reliability.

Technological management of traction power supply equipment ensures management efficiency by increasing the efficiency of management decision-making.

The proposed hierarchical model of the information environment architecture for railway power supply system critical objects control is a combined. Along with the automation subsystems based on the DB in the

architecture (fig. 2), the integration of non-formalized knowledge represented in the architecture by the central energy dispatching point of Ukrzaliznytsia and the automated workplace of the dispatcher at the power supply distance level is provided.

The proposed hierarchical model is based on the principle of a single information space and represents a distributed system with geographically distant objects, where the top level is occupied by the central energy dispatching point of Ukrzaliznytsia. Its implementation involves the use of existing local computer networks of various levels, modernization of software and increased use of microprocessor devices.

Conclusions

It is proposed to consider the hierarchical model of the information environment as a structure based on its functions, which are implemented by the software part, and the architecture, which is responsible for the effective provision of their implementation.

A hierarchical model of the information environment, which takes into account the availability of Ukrzaliznytsia's own generation sources by integrating appropriate control subsystem into the information system structure, is developed.

Acknowledgments

The work was carried out with the support of the National Research Fund of Ukraine within the framework of the development of the project 2022.01/0224 on the topic "Development of scientific foundations of comprehensive improvement of safety, efficiency of operation and management of critical objects of railway transport in the conditions of post-war development of Ukraine".

References

1. АТ «Українська залізниця» (28.06.2024) Укрзалізниця створює нову компанію «УЗ Енерго». Режим доступу: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/632524 (дата звернення 20.08.2024)
2. Беляков, Р. (2024). Ієрархічна модель інтелектуального управління наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. (54). 225-235. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-28>
3. Мартюк, М. Ю., Оксанич І. Г., Шевченко, І. В. (2021). Моделі ієрархічної багатоагентної системи для виконання бізнес-процесів. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 6/2021 (131). 73-78. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.6.73-78>
4. Джулій, В. М., Муляр, І. В., Сєлюков, О. В., Чешун, В. М., Коровченко, Д. В., Берназ, А. А. (2020). Ієрархічна мережева модель інформаційного забезпечення подання предметної області. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. (65). 27–39. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2019/65-04>
5. Голуб Г. М. (2013). Комп'ютерна інтелектуалізація режимів функціонування та процедур управління системи електропостачання залізниць. Зб. наук. праць ДЕГУТ: серія «Транспортні системи і технології». К.: ДЕГУТ. 134–141.
6. Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., Sikhakhane, Z. Q. (2024). The impact of smart grids on energy efficiency: a comprehensive review. Engineering Science & Technology Journal. 5(4). 1257-1269. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1016>
7. Chinedu Alex Ezeigweneme, Chinedu Nnamdi Nwasike, Adedayo Adefemi, Abimbola Oluwatoyin Adegbite, & Joachim Osheyor Gidiagba. (2024). Smart Grids in industrial paradigms: a review of progress, benefits, and maintenance implications: analyzing the role of smart grids in predictive maintenance and the integration of renewable energy sources, along with their overall impact on the industri. Engineering Science & Technology Journal. 5(1). 1-20. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.719>
8. Сопель, М. Ф. (2015). Моніторинг в електроенергетиці [Рукопис]: дис. д-ра техн. наук: 05.14.02. К., 430 с.
9. Кримська, А., Пономаренко, О. (2024). Інформаційні технології для підвищення ефективності енергосистем України. Системні дослідження в енергетиці. 2а (78), 26-27. <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/846>
10. Kovtun, S., Ponomarenko, O., Nazarenko, O. (2023). Quality of the Information Flow Management at Stochastic Energy Consumption Conditions. System Research in Energy. 3 (74). 78-84. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.078>
11. Печенюк, А., Печенюк, В. (2024). Перспективи застосування штучного інтелекту для покращення енергозбереження в умовах України. Інноваційна економіка. 0(2). 46-52. <http://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1246>
12. Слободян, А. Р., Чижевський, В. В., Слободян, Р. О. (2024). Модель роботи розподільної мережі в ізолюваному режимі. Вісник Вінницького політехнічного інституту. (3). 40–49. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-40-49>
13. Верес, О. М. (2010) Види архітектури систем підтримки прийняття рішень. Вісник

- Національного університету «Львівська політехніка». № 685. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 190–197.
14. Haidenko, O. S. (2016). Optimization of the train's schedule to use three-zone differentiated tariff for consumed electricity payment. Information and control systems at railway transport. (5). 46-50. ISSN 1681-4886. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i5.83424>
 15. Haidenko, O. S. (2016). Mathematical methods of computer adaptation train schedule for electricity payment consumed of traction in accordance with commercial tariff. Scientific journal "Electrification of Transport". № 12. 8-11. ISSN 2307-4221. Retrieved from <http://etr.diit.edu.ua/article/view/100557>
 16. Haidenko, O. S. (2018). Experimental researches of computer-oriented methods of consumed electricity payment minimization. Information and control systems at railway transport. (4). 30-34. ISSN 1681-4886. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i4.141927>
 17. Bosyi, D. O. (2017). The development of scientific bases of energy efficiency modes of power supply the electrified railways. Thesis for the degree of Doctor of Science: 05.22.09. D. 396 p.
 18. Бобало, Ю. Я., Даник, Ю. Г., Комарова, Л. О., [та ін.]. (2015). Моніторинг об'єктів в умовах апіорної невизначеності джерел інформації. Львів. 360 с. Retrieved from <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/39313>
 19. Гайденко, О. С. (2015). Методи прогнозування електроспоживання тяговими підстанціями залізниці. Моделювання та інформаційні технології. 36. наук. пр. ПІМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України. Київ. Вип. 75. 49-56.
 20. Haidenko, O., & Holub, H. (2018). Electric power consumption forecasting by methods of neural network modeling. Transport Systems and Technologies. (31). 196–202. Retrieved from <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/24>
 21. Гайденко, О. С., Голуб, Г. М., Кульбовський, І., Штомпель, Ю. М. (2022). Дослідження ефективності архітектур штучних нейронних мереж для прогнозу електроспоживання залізниць. Залізничний транспорт України. №1. 51-55. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-142-1-51-55>
 22. Lowe, M., Fan, H., Gereffi, G. (2011). U.S. Smart Grid. Finding new ways to cut carbon and create jobs. CGGC. Duke University. DOI: <https://10.13140/RG.2.1.2076.3928>
 23. Turner, Chris & Tiwari, Ashutosh & Starr, Andrew & Blacktop, Kevin. (2016). A review of key planning and scheduling in the rail industry in Europe and UK. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 230. 984-998. DOI: <https://10.1177/0954409714565654>
 24. Boucher, T., & Yalcin, A. (2006). Design of Industrial Information Systems ([1 ed.]). Academic Press. 496.
 25. Spurgeon E. Charles & Joann Zimmerman (2014). Ethernet: The Definitive Guid. O'Reilly. 2014. 483. ISBN 978-1449361846
 26. Katz, R. H., Culler, D. E., Sanders, S., Alspaugh, S. [and other] (2011). An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view. Sustainable Computing: Informatics and Systems. (1). 7–22. DOI: <https://10.1016/j.suscom.2010.10.001>
- Гайденко О. С., Голуб Г. М., Кульбовський І. І. Ієрархічна модель інформаційного середовища керування критичними об'єктами системи електропостачання залізничного транспорту**
- Анотація.* Розробка ієрархічної моделі інформаційного середовища керування критичними об'єктами системи електропостачання залізничного транспорту є актуальною науково-технічною задачею, що дозволить підвищити ефективність управлінських рішень шляхом інтеграції різномірної інформації та забезпечення її своєчасного аналізу в єдиному інформаційному середовищі. Важливість даної проблеми обумовлена складністю об'єктів електропостачання, необхідністю оперативного реагування на нештатні ситуації та критичністю наслідків можливих відмов системи, імовірність яких лише зростає через руйнування об'єктів електроенергетики України російською федерацією разом із посиленням дефіциту електроенергії в об'єднаній енергетичній системі України. Тому сьогодення вимагає переосмислення інформаційного середовища керування системою електропостачання, зокрема й у зв'язку з будівництвом газових електростанцій для потреб Укрзалізниці.
- Ієрархічну модель інформаційного середовища пропонується розглядати як структуру відповідно до її функцій (реалізованих програмною частиною) та архітектури (відповідає за ефективну реалізацію функціональних можливостей).
- Пропонується удосконалювати інформаційну систему управління критичними об'єктами електропостачання Укрзалізниці на основі розробленої ієрархічної моделі інформаційного середовища, що враховує наявність власних джерел генерації Укрзалізниці, шляхом інтеграції відповідної підсистеми керування в структуру інформаційної системи. Модель підкреслює інтеграцію програмних і апаратних компонентів для збору даних, попередньої обробки та прийняття рішень, сприяючи побудові високоавтоматизованої інтелектуальної системи керування, пропонує багаторівневу структуру, що передбачає використання передових технологій обробки даних і штучних нейронних мереж для

оптимізації перевізного процесу, ефективного управління власними джерелами генерації задля зменшення витрат на закупівлю та виробництво електричної енергії.

Ключові слова: *hierarchical model, control, power supply, information, railway.*

Гайденко Олесь Сергійович, кандидат технічних наук, викладач Київського електромеханічного фахового коледжу, Київ, Україна. E-mail: haidenko121@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8308-3910>

Голуб Галина Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна. E-mail: golub.galina@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

Кульбовський Іван Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5329-3842>

Oles Haidenko, PhD, lecturer, Kyiv Electromechanical Professional Pre-Higher College, Kyiv, Ukraine. E-mail: haidenko121@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8308-3910>

Halyna Holub, PhD, Associate Professor, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of Transport, State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine. E-mail: golub.galina@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

Ivan Kuibovskiy, PhD, Associate Professor, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of Transport, State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5329-3842>

КРАШЕНІНІН О. С., д.т.н., професор,
ШАПАТІНА О. О., к.т.н., доцент,
КОВАЛЬОВ А. О., к.т.н., доцент,
ЗАПАРА Я. В., к.т.н., доцент,
КОВАЛЬОВА О. В., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Оцінювання перспектив упровадження альтернативних технологій перевезень вантажів

Досвід передових країн показує, що запровадження нових видів транспорту сприяє підвищенню конкурентоспроможності транспортної галузі та збереженню навколишнього середовища, особливо актуальне в умовах дефіциту ресурсів. Відповідно до цього в статті розглядають питання щодо перспектив упровадження альтернативних технологій перевезень в Україні.

У статті наведені результати формування процедури визначення оцінки транспортних технологій на основі оптимізації витрат на перевезення з урахуванням кваліметричного критерію. У результаті виконаних досліджень сформовано загальну процедуру оцінювання транспортних технологій доставки вантажів на полігоні на основі принципів кваліметрії, яка, на відміну від існуючих підходів, дає змогу враховувати комплекс факторів, що впливають на вибір транспортної технології.

Отримана процедура оцінювання транспортних технологій може доповнювати традиційні підходи до формування транспортних технологій.

Ключові слова: залізничний транспорт, альтернативні технології перевезень, комбіновані перевезення, кваліметричний критерій.

Вступ

За Транспортною стратегією України, в умовах Євроінтеграції одним із пріоритетних напрямів діяльності транспорту є надання якісних і ефективних послуг із перевезень вантажів і пасажирів. З цієї метою необхідно запроваджувати нові передові технології перевезень, зокрема розвивати альтернативні види транспорту. При взаємодії різних видів транспорту особливої актуальності набувають інтермодальні, комбіновані та мультимодальні перевезення як перспективні напрями розвитку транспортної галузі за участю залізниці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні найбільше застосування з усіх видів комбінованих перевезень на залізницях України знайшли контейнерні перевезення, що забезпечує доставку вантажів. Система контейнерних перевезень дає змогу залучати до комбінованих перевезень автомобільний, залізничний, морський, річковий і повітряний транспорт. При цьому в деяких країнах контейнери завантажують у два яруси, що дає

можливість знизити витрати на транспортування [1, 2].

Саме тому перспективним напрямом у розвитку транспортної галузі України є використання сучасних транспортних технологій. Як показує світовий досвід, традиційні системи доставки вантажів можуть бути доповнені сучасними системами, такими як поїзди на магнітному підвішуванні, судна на повітряній подушці, капсули Hyperloop, безпілотні машини, гірокоптери, квадрокоптери з великою вантажопідйомністю, а також переходом транспорту на альтернативні джерела енергії та види палива [3].

Так, у Японії, Китаї та Німеччині набули розвитку поїзди на магнітному підвішуванні. Така система доставки має ряд переваг: висока швидкість доставки, ефективніше, ніж в авто- та авіатранспорту, ефективніше використання енергії, низький рівень шуму [4, 5].

У США було протестовано перший поїзд-гіперлуп, що досягає швидкості від 480 до 1220 км/год і має можливість перевозити не тільки пасажирів, а й їхні транспортні засоби [6].

У наш час усе більшої актуальності набуває доставка вантажів за допомогою квадрокоптерів. Широкого вжитку, а й у майбутньому перевозити людей, переміщуючи їх на невеликій висоті заради їхньої безпеки. Шлях квадрокоптера буде проходити

© КРАШЕНІНІН О. С., ШАПТІНА О. О., КОВАЛЬОВ А. О., ЗАПАРА Я. В., КОВАЛЬОВА О. В., 2024

Квадрокоптер з великою вантажопідйомністю має можливість перевозити не тільки товари

над наявними шляхами й іншими елементами інфраструктури [7].

Закордонний підхід заснований на високому рівні розвитку промисловості, але, на жаль, наша країна знаходиться у складних економічних і політичних умовах, частина території анексована, промислова інфраструктура частково або повністю зруйнована та перебуває під обстрілами, що значно ускладнює роботу всіх транспортних об'єктів.

Зрозуміло, що запровадження сучасних транспортних технологій потребує великих капітальних вкладень у побудову, освоєння та обслуговування транспортної інфраструктури. А враховуючи те, що Україна знаходиться в умовах воєнного стану, стає актуальним питання оцінювання надання пріоритету рішенням із запровадження транспортних технологій, які можливо реалізувати вже сьогодні. Це у свою чергу потребує оцінювання конкурентоспроможності запровадженого транспорту порівняно з традиційним із урахуванням кваліметричного критерію, що об'єднує вагові технічні та витратні фактори.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає в оцінюванні перспектив альтернативних технологій перевезень з урахуванням якісних показників.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- сформулювати модель оцінювання ефективності використання альтернативних технологій перевезень при забезпеченні оптимальних витрат;
- оцінити ефективність транспортної технології перевезень на основі кваліметричного критерію.

Основна частина дослідження

У сучасних умовах інтеграції України в Європейський Союз актуальним є питання реформування транспортної вітчизняної системи, зокрема української залізниці. За прийнятим Кабінетом Міністрів України від 30 травня 2018 року розпорядженням «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року», українську транспортну систему очікують серйозні зміни. Щодо вітчизняної залізниці, то передбачені такі заходи: лібералізація ринку залізничних перевезень на основі рівноправного доступу до залізничної інфраструктури та справедливої конкуренції між перевізниками; нормативно-правове забезпечення функціонування ринку залізничних перевезень; запровадження механізму допуску до ринку залізничних перевезень перевізників різних форм власності; структурна реформа АТ «Укрзалізниця», що передбачає фінансове та організаційне розділення оператора інфраструктури та перевізника [8-10].

На сьогодні одним із основних питань є запровадження сучасних технологій перевезень, ураховуючи воєнний стан в Україні та нестачу енергоресурсів.

Вибір транспортної технології необхідно робити з урахуванням якісної складової, використовуючи методи теоретичної кваліметрії [11]. Різноманіття транспортних засобів не дає змоги комплексно оцінювати їхні властивості. Так, у різних видів транспорту діапазон використання технічних характеристик відрізняється, тому для об'єктивного оцінювання транспортної технології застосовують кваліметричний показник, виражений у транах, з урахуванням витрат. Тран є кількісною величиною корисного ефекту транспортної операції [12].

Отже, критерій, який відповідає оптимальним витратам на перевезення з урахуванням кваліметричної складової [грн/тран], запишемо як [12]

$$P(l_i) = \sum_j \sum_i \mu_i \frac{d_i}{\varpi_i \cdot \prod_{i=1}^n \kappa_i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де j – змінна, що відповідає маршруту доставлення вантажу, $j = \overline{1, L}$;

i – змінна, що відповідає транспортній технології доставлення вантажу, $i = \overline{1, N}$;

l_i – маршрут доставлення вантажів різними транспортними технологіями, км;

μ_i – значущість транспортних технологій, $\sum \mu_i = 1$;

d_i – транспортні витрати на перевезення, грн;

ϖ_i – корисний ефект транспортної операції, тран;

$\prod_{i=1}^n \kappa_i$ – коефіцієнти, що відображують комерційну віддачу, запас динамічних властивостей, відношення витрат на утримання транспортного засобу за життєвий цикл до його вартості, витрат часу під технологічними операціями.

При цьому корисний ефект оцінюють так:

$$\varpi_i = m_i \cdot v_i^2 \cdot l_i \rightarrow \max, \quad (2)$$

де m_i – маса вантажів, що доставляють різними транспортними технологіями, т;

v_i – швидкість переміщення транспортного засобу, км/год.

Коефіцієнти $\prod_{i=1}^n \kappa_i$ визначають відповідно так:

- коефіцієнт комерційної віддачі κ_{1i}

$$\kappa_{1i} = \frac{h_i}{M_i}, \quad (3)$$

де h_i – вантажопідйомність транспортного засобу, т;

M_i – маса транспортного засобу в завантаженому стані, т;

- коефіцієнт запасу динамічних властивостей транспортного засобу κ_{2i}

$$\kappa_{2i} = \left(\frac{v_{\max i}}{v_{pi}} \right)^2, \quad (4)$$

де V_{max_i} – максимальна швидкість транспортного засобу разом із вантажем, км/год;

V_{p_i} – розрахункова швидкість транспортного засобу, км/год;

- коефіцієнт, що враховує відношення витрат на утримання транспортного засобу за життєвий цикл до його вартості, κ_{2i}

$$\kappa_{2i} = \frac{C_{v_i}}{\sigma_{v_i}}, \quad (5)$$

де C_{v_i} – витрати на утримання транспортного засобу за життєвий цикл, грн;

σ_{v_i} – вартість транспортного засобу, грн;

- коефіцієнт, що враховує скорочення часу під технологічними операціями, κ_{4i}

$$\kappa_{4i} = 1 - \frac{\phi_i}{T_i}, \quad (6)$$

де ϕ_i – приріст значення часу під технологічними операціями за різними технологіями, год;

T_i – час під технологічними операціями за базовою технологією, год.

Тоді показник, який відповідає витратам на перевезення з урахуванням кваліметричної складової для різних технологій перевезень, визначають як

$$P(l_i) = \sum_j \sum_i \mu_i \frac{d_i \cdot \left(1 - \frac{\phi_i}{T_i}\right)}{m_i \cdot v_i^2 \cdot l_i \cdot \frac{l_i}{M_i} \cdot \left(\frac{V_{max_i}}{V_{p_i}}\right)^2 \cdot \frac{C_{v_i}}{\sigma_{v_i}}} \rightarrow \min. \quad (7)$$

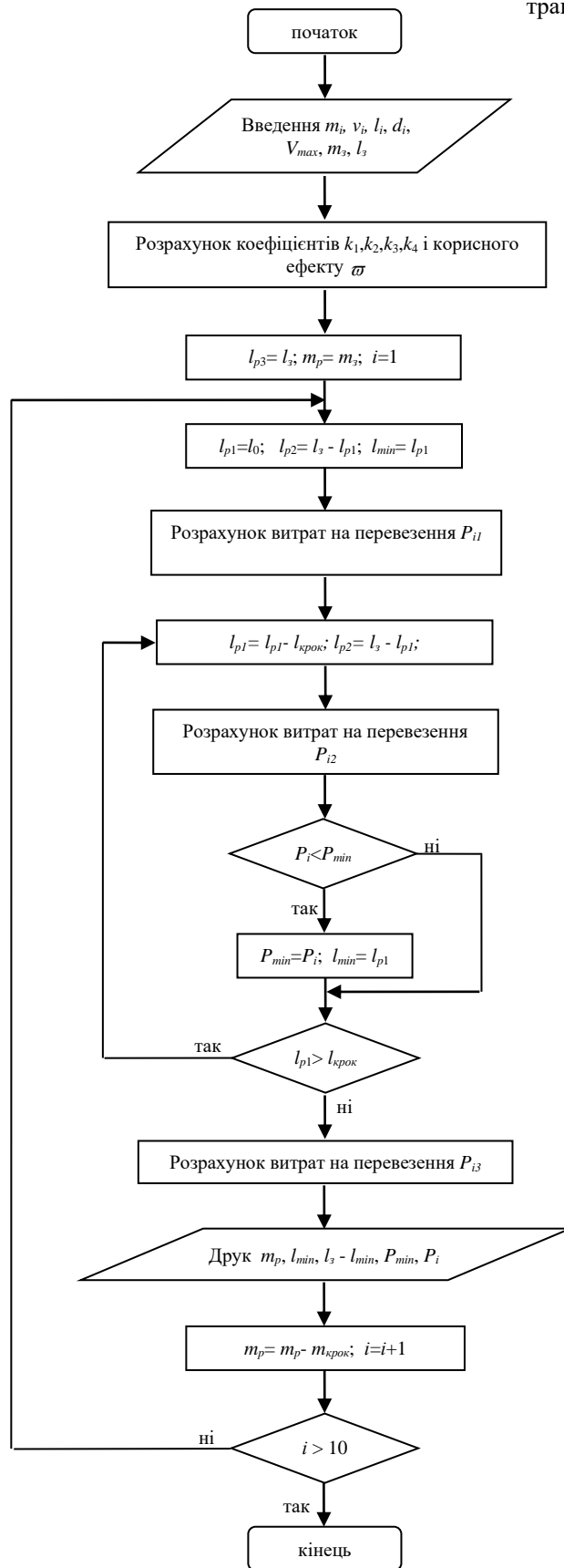
За таких обмежень,

$$\begin{cases} m_i > 0; l_i > 0; l_i \leq l_p; \\ \sum \mu_i = 1; \mu_i \geq 0; \\ 0 < V_{p_i} \leq v_i \leq V_{max_i}. \end{cases} \quad (8)$$

де l_p – відстань до пункту призначення, км.

Вирішувати поставлене завдання доцільно за допомогою методів оптимізації за структурною схемою, наведеною на рис. 1.

Рис. 1. Структурна схема алгоритму вибору транспортних технологій



При виборі технології перевезень вантажів треба враховувати важливість кожної складової кваліметричного показника в будь-який період часу для прийняття рішень про пріоритет використання відповідних технологій у конкретних ситуаціях і обмеженнях. При цьому отриманий уточнений

показник урахуває вагові технічні та витратні фактори транспортних технологій. Реалізація процедури вибору виду транспортної технології за кваліметричним критерієм наведена на рис. 2.

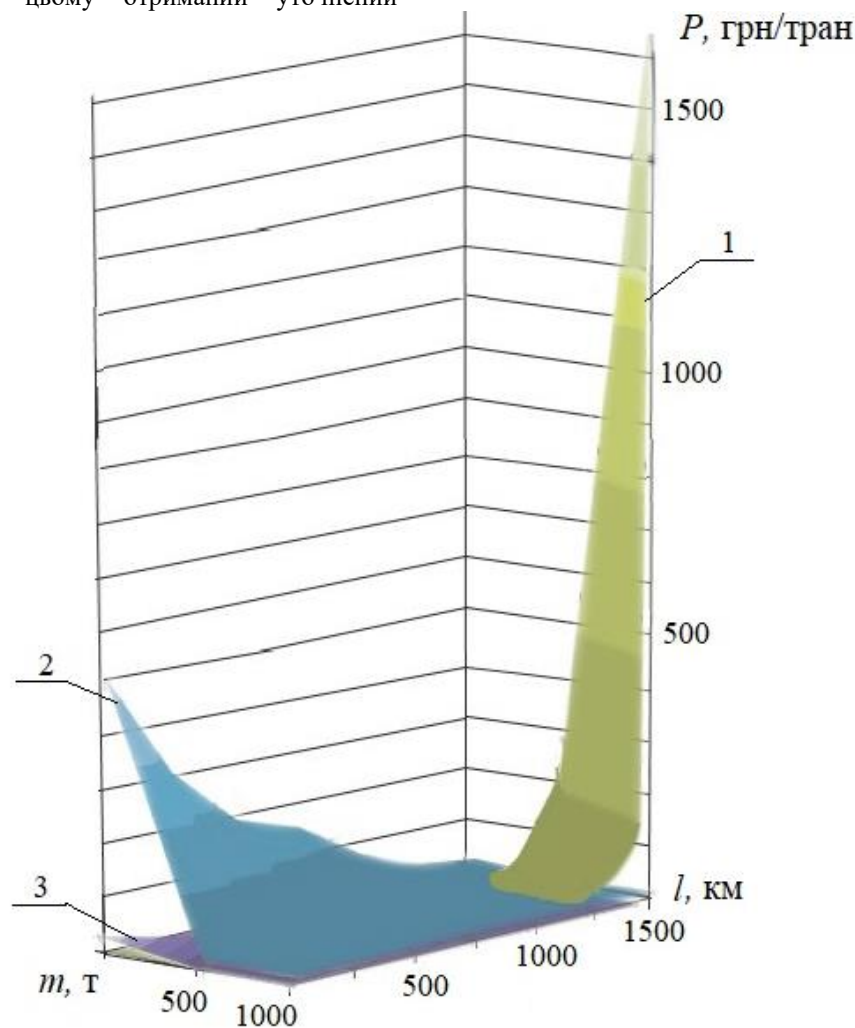


Рис. 2. Визначення транспортної технології на основі оптимізації витрат на перевезення з урахуванням кваліметричного критерію:
1 – автомобільний транспорт; 2 – залізничний транспорт;
3 – комбінований транспорт

Як видно з цього, можна наглядно визначити оптимальну область досягнення мінімальних витрат на перевезення при виборі альтернативних транспортних технологій.

Так, відповідно до рис. 2 можна зробити висновок, що за відстані більше 750 км доцільно використовувати залізничний транспорт, тоді як автомобільний транспорт є ефективним на відстані до 500 км, комбінований транспорт доцільно використовувати на відстані в межах 250-300 км. Тобто зону конкурентного використання цих видів транспорту можна обмежити відстанню від 250 до 1500 км. За відстані більше 1500 км ефективним є тільки залізничний транспорт. Разом із тим у

сучасних реаліях усе більше уваги стали приділяти використанню альтернативного виду транспорту, як більш мобільного та оперативного.

Слід зазначити, що процес покращення якості управління перевезень невід'ємний від вирішення таких завдань, як визначення оптимального маршруту доставлення вантажів, пошук оптимальної взаємодії видів транспорту в місцях перевалювання вантажу, використання альтернативних енергетичних ресурсів. Пошук оптимального маршруту доставлення вантажів ефективно здійснюють методами лінійного і динамічного програмування. Завдання оптимальної взаємодії різних видів транспорту вирішують через реалізацію запропонованого алгоритму на основі кваліметричного критерію. Вибором альтернативних

джерел енергії є перехід на гібридні енергетичні транспортні засоби, що використовують акумульовану енергію або від дизельного двигуна, або сонячних батарей, якими обладнаний транспортний засіб. Усе це дасть змогу покращити роботу і підвищити ефективність транспорту в цілому, дещо зменшити впливи кризових ситуацій в економіці, забезпечити ресурсозбереження.

Отримана процедура вибору транспортних технологій може доповнювати традиційні підходи з удосконалення перевезень, у тому числі і за умов використання нових транспортних засобів.

Тобто за допомогою альтернативних технологій доставлення вантажів можна мінімізувати експлуатаційні витрати, терміни доставлення та збільшити фінансові надходження в бюджет України від транзитних перевезень і за рахунок цього підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту.

Важливим фактором підвищення ефективності перевезень вантажів в умовах воєнного стану є використання безпілотних вантажних транспортних засобів: гірокоптерів і квадрокоптерів через виключення людського фактора та відповідно збереження життя громадян. Інші технології перевезень вантажів можуть бути розглянуті в рамках наведеної методики на перспективу зі стабілізацією економіки в Україні.

Висновки.

1. Сформовано модель оцінювання ефективності використання різних транспортних технологій із забезпеченням оптимальних витрат на основі кваліметричного критерію.

2. Оцінено ефективність транспортної технології перевезень на основі кваліметричного критерію згідно зі сформованим алгоритмом. Побудована просторова графічна залежність, за допомогою якої наглядно зображені зони ефективності різних технологій перевезень. Так, оптимальне значення витрат для комбінованого транспорту P знаходиться в межах до 100 грн/тран у зоні 250-300 км. Аналогічно визначають зони ефективності та оптимальні значення витрат для інших видів транспортних технологій.

Отже, визначення ефективних зон використання за відповідних обмежень і запровадження альтернативних технологій перевезень дасть змогу підвищити якість надання транспортних послуг, оптимізувати швидкість перевезення, впливати на енергоефективність перевезень, а також може сприяти збереженню навколишнього середовища за рахунок використання чистих джерел енергії, дасть можливість забезпечити відновлення транспортної галузі та підвищити конкурентоспроможність українських перевезень.

Список використаних джерел

1. Upadhyay A., Gu W. H., Bolia N. Optimal loading

- of double-stack container trains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Elsevier*. 2017. Vol. 107. P. 1–22.
2. Mantovani S., Morganti G., Umang, N., Crainic, T. G., Frejinger E., Larsen E. The load planning problem for double-stack intermodal trains. *European Journal of Operational Research, Elsevier*. 2018. Vol. 267(1). P. 107–119.
3. Про альтернативні види палива: Закон України № 1391-VI від 21.05.2009 р. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2000. № 12, ст. 94. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>.
4. Теряев В. І., Ліберт Н. Є. Монорейки КПП: історія магнітного польоту. *Київський політехнік*. Газета НТУУ КПП ім. Ігоря Сікорського. 2018. № 3 (3219). С. 6-7.
5. В Китаї продемонстрували найшвидший у світі потяг на магнітній подушці. URL: <https://www.unian.ua/science/v-kitaji-prodemonstruvali-nayshvidshiy-u-sviti-potyag-na-magnitniy-podushci-video-novini-11489437.html>.
6. Скоростной пневмопоезд на магнитной подушке соединит шесть городов Украины со всем миром. URL: <https://traffic.od.ua/news/railua/1187500>.
7. У Китаї випробували літаючий дрон-таксі з пілотом у середині. URL: <https://hromadske.ua/posts/u-kytai-vyprobuvaly-litaiuchy-dron-taksi-z-pilotom-useredni>.
8. Мірошник Р. О., Федак К. Я. Стратегічні напрями розвитку залізничного транспорту в Україні. *Економіка та суспільство*. 2021. № 32. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-32-90>.
9. Бараш Ю. С., Чаркіна Т. Ю. Стратегія управління реформуванням залізничним транспортом України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. № 53. С. 24–30.
10. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#n13>.
11. Panchenko S., Lavrukhin O., Shapatina O. Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 1, № 3(85). P. 39–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.92203.
12. Шапатіна О. О. Формування автоматизованої технології управління інтермодальними перевезеннями: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2020. 203 с.

Krasheninina O. S., Shapatina O. O., Kovalov A. O., Zapara Y. V., Kovalova O. V. Assessment of prospects

for the implementation of alternative technologies of cargo transportation.

Abstract. According to the Transport Strategy of Ukraine in the conditions of European integration, one of the priority areas of transport activity is the provision of high-quality and efficient services for the transportation of goods and passengers. For this purpose, it is necessary to introduce new advanced transportation technologies, in particular, to develop alternative modes of transport. When different types of transport interact, intermodal, combined and multimodal transports become particularly relevant as promising directions for the development of the transport industry with the participation of railways.

A promising direction in the development of the transport industry of Ukraine is the use of modern transport technologies. As world experience shows, traditional cargo delivery systems can be supplemented with modern systems such as magnetic levitation trains, hovercraft, Hyperloop capsules, unmanned vehicles, gyrocopters, quadcopters with large cargo capacity, as well as the transition of transport to alternative energy sources and types fuel.

The experience of advanced countries shows that the introduction of new types of transport contributes to increasing the competitiveness of the transport industry and preserving the environment, which is especially relevant in conditions of resource scarcity. Accordingly, the article examines the prospects for the introduction of alternative transportation technologies in Ukraine.

The foreign approach is based on a high level of industrial development, but, unfortunately, our country is in difficult economic and political conditions, part of the territories are annexed, the industrial infrastructure is partially or completely destroyed and is under fire, which greatly complicates the operation of all transport facilities.

It is clear that the introduction of modern transport technologies requires large capital investments in the construction, development and maintenance of transport infrastructure.

Considering the fact that Ukraine is in a state of war, the issue of prioritizing decisions on the introduction of transport technologies that can be implemented today is becoming urgent. This, in turn, requires an assessment of the competitiveness of the introduced transport in comparison with the traditional one, taking into account the qualitative criterion that combines weighty technical and cost factors.

Keywords: railway transport, alternative transportation technologies, combined transportation, qualimetric criterion.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7462-3372>. Тел.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Ковальов Антон Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>. Тел.: +38 (096)4106726. E-mail: kovalovanton1979@gmail.com.

Запара Ярослав Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0504-7890>. Тел.: +38 (097) 9506216. E-mail: y.zapara@gmail.com.

Ковальова Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-0795>. Тел.: +38(067)2523185. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

Krashenin Oleksandr Semenovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7462-3372>. Тел.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Shapatina Olha Oleksandrivna, PhD (Tech), Associate Professor of Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Kovalov Anton Oleksandrovich, PhD (Tech), Associate Professor of Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>. Тел.: +38 (096)4106726. E-mail: kovalovanton1979@gmail.com.

Zapara Yaroslav Victorovich, PhD(Tech), Associate Professor of Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0504-7890>. Тел.: +38 (097) 9506216. E-mail: y.zapara@gmail.com.

Kovalova Oksana Volodymyrivna, PhD (Tech), Associate Professor of Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-0795>. Тел.: +38(067)2523185. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

UDC 004.8

DOI: 10.18664/iksz.v29i3.313606

Olesia Barkovska,
Anton Havrashenko.
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF THE IMPACT OF NOISE REDUCTION METHODS ON THE QUALITY OF AUDIO SIGNAL RECOVERY

Abstract.

The subject of the study is the analysis of various filtering algorithms for the quality of the resulting audio files. The importance of audio line filtering has grown significantly in recent years due to its key role in a variety of applications such as speech reduction and artificial intelligence. Taking into account the growing demand for solving problems related to speech recognition, the processing of audio series becomes important for determining the accuracy and efficiency of the obtained solution.

The purpose of the work is to study the impact of noise suppression methods on the quality of restoration of an audio signal, which was alternately noisy with one of five types of noise - white, pink, brown, impulse, Gaussian with different power. To achieve the goal, the following tasks were solved: an analysis of the types of noise was carried out and analysis of noise reduction and filtering methods. A generalized model of noise reduction and filtering was developed, and an experiment was planned depending on the type and power of noise. Simulation of the experiment was performed by comparing the parameters of the signal-to-noise ratio before and after the experiment and the peak signal-to-noise ratio in the processed file. The following methods are used: spectral subtraction, filtering based on frequency filters and wavelet transformation.

The following results were obtained: depending on the selected noises and algorithms, it was possible to achieve the lowest value of the peak signal-to-noise ratio of 21.52db, and the signal-to-noise ratio increased, which allowed further work with these audio files. The practical significance of this work is the increase in the number of available audio files for further work.

Conclusions: the analysis of the obtained results showed that filtering based on frequency filters only worsened the output signal, that is, not only noise, but also useful information is filtered. In all runs, the SNR deteriorates to -18dB, which is worse than no filtering. Algorithms of spectral subtraction and wavelet transformation improved SNR parameters and output audio files noisy with the most powerful noises in the range of 20dB, which can be considered acceptable for further processing. The results highlight the importance of using denoising and filtering for complex audio processing tasks, particularly neural network training tasks.

Key words: noise suppression, filtering, audio, noise, SNR, PSNR, spectral subtraction, frequency filters, wavelet transform, experiment

Introduction

In today's world, speech recognition is becoming increasingly important as a key technology in many aspects of our lives. From user interfaces to security systems, from audio and video transcription to interacting with electronic devices using voice commands, automated speech recognition is becoming a necessary element of our digital lives.

Language analytics covers a wide range of technologies and methods that allow processing and analysis of speech information. One of the key technologies in this field automatic speech recognition[1]. This technology converts spoken speech into text, which has numerous applications in various industries, from captioning to interactive voice assistants.

Text-to-Speech[2] is another important aspect of speech analytics. This technology allows you to convert text data into natural speech, which is used in the creation of audio books, interactive customer support systems, as well as in assistive technologies for people with visual impairments.

In addition, the analysis of emotions in the voice is becoming more and more popular. This technology uses machine learning algorithms to determine a person's emotional state based on their voice. This can be useful in the fields of psychology, healthcare, and customer service, where a customer's emotional state can affect the quality of service.

Language analytics also includes automatic conversation analysis. Such systems can provide important information to improve customer service and optimize business processes.

However, the accuracy of speech recognition can significantly depend on the quality of the input audio signal and the efficiency of signal processing algorithms before its analysis by neural networks. One of the main challenges in this context is managing the noise that may occur during audio recording (for example, noise from background music, conversations or the noise of household appliances).

Modern trends in the development of speech recognition technologies include the use of deep neural networks[3] and machine learning methods, which have significantly increased the accuracy and reliability of systems. However, even with the most advanced algorithms, noise in the input data remains a significant obstacle.

Thus, in this study, we focus our attention on investigating the impact of different audio preprocessing algorithms on the quality of speech recognition using neural networks. The choice of optimal signal processing methods before further analysis can significantly improve the effectiveness of automatic speech recognition systems in conditions of

noise and interference. We will also look at current approaches to noise removal and their effectiveness in real-world use cases.

The purpose of our research is to develop and test pre-processing algorithms that will reduce the noise level in input audio signals and increase the accuracy of speech recognition. Tasks include comparing existing methods, developing new approaches, and evaluating their performance on different data sets.

It is expected that the results of the research will make a significant contribution to the development of speech recognition technologies, which will improve the quality of user interaction with various digital systems and increase the overall effectiveness of these technologies in everyday life.

STATE OF THE ART

In works [4-6], a significant amount of research was conducted aimed at improving the quality of speech recognition using neural networks and the impact of various audio signal processing methods on recognition accuracy. The results show that the noise present in the audio sequences has a significant impact on the recognition accuracy. The classification of noise types is shown in (fig. 1).

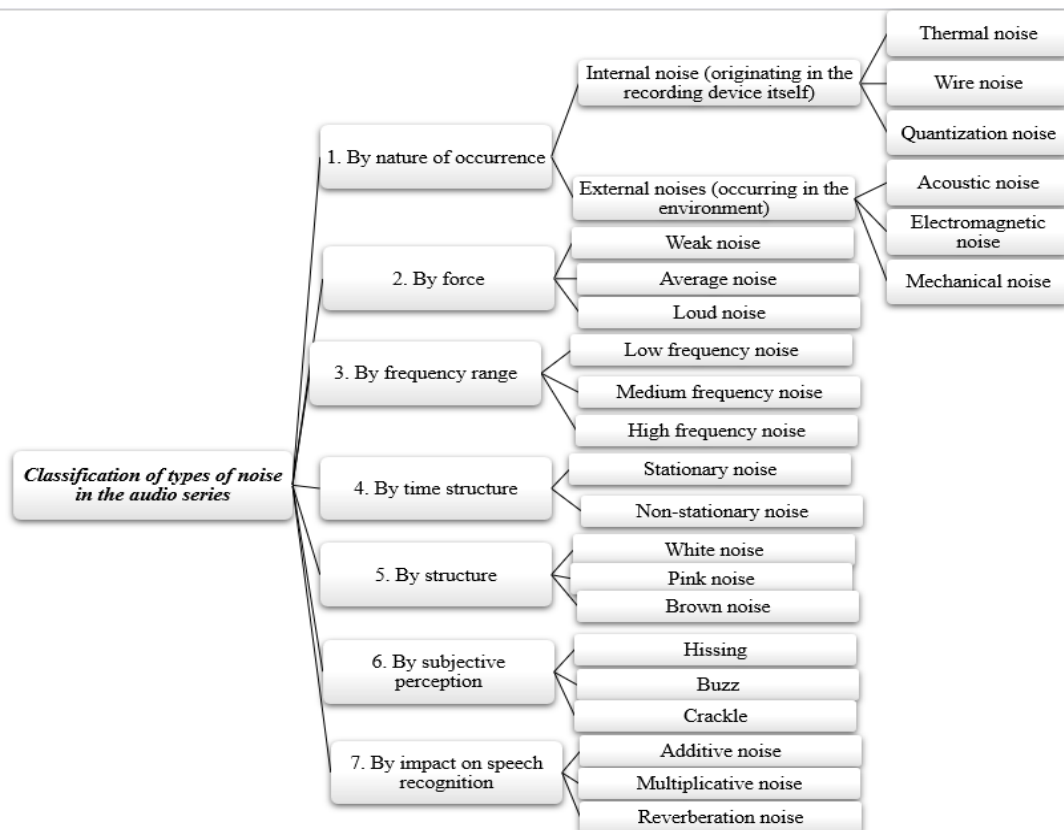


Figure 1 – Noise classification

Further studies analyze the effect of white, pink, brown, impulse, and Gaussian noise on recognition accuracy, because these types of noise were chosen due to their wide use in various fields of science and technology for modeling and testing systems under various noise exposure conditions.

Noise suppression [7] consists in actively reducing unwanted sounds or signals. It is applied in real time, using algorithms to identify and eliminate noise, leaving a useful signal. The primary purpose of noise reduction is to remove background noise or

interference, such as hum, hiss, or extraneous sounds, to improve the intelligibility or clarity of the underlying signal, such as a voice in a telephone conversation or music.

In order to understand which noise reduction methods will be the most effective, it is necessary to understand their differences. The paper offers a comparative analysis of selected types of noise according to the following criteria: frequency spectrum, power spectral density, acoustic perception, application. The comparison is shown in the Table 1.

Table 1. – Noise comparison

| Comparison criteria | White noise | Pink noise | Brown noise | Impulse noise | Gaussian noise |
|-------------------------------|--|---|--|---|---|
| Frequency spectrum | Even, all frequencies with equal intensity | The power spectral density drops by 3 dB per octave | The power spectral density drops by 6 dB per octave | Consists of short, intense bursts of sound that occur due to sudden changes in the signal | The amplitude is distributed according to a normal (Gaussian) distribution. |
| Power spectral density | Constant density at all frequencies | Density is inversely proportional to frequency (1/f) | Density is inversely proportional to the square of the frequency (1/f ²) | Uneven character, with peaks on pulses | Even frequency spectrum |
| Acoustic perception | "Sharp" and "noisy" sound | A more natural and soft sound, similar to rain | A deep and soft sound, similar to heavy sea waves or thunder | Sharp, intense sounds | A hiss that has no orderly structure or rhythm |
| Application | Audio equipment testing, sound masking, sleep aid, concentration improvement | Audio engineering, acoustics testing, relaxation, sleep aid | Sound masking, audiological experiments, relaxing background | Security systems to detect intrusions or other abnormal events | Modeling and testing of communication systems |

Filtering is a signal processing process that allows or blocks certain frequencies or frequency ranges. It works on the principle of selecting the desired frequencies or reducing unwanted frequencies that can cause noise or distortion. Filtering can be done in a variety of ways, such as low-pass, high-pass, or band-pass filtering, and is applied not only to audio, but also to other types of signals, such as radio, images, or data.[8]

So, the main difference between noise suppression and filtering lies in their approaches and mechanisms:

- noise suppression focuses on active noise detection and removal;
- filtering adjusts the frequency composition of the signal, allowing or blocking certain frequencies.

Among the existing methods of noise filtering and noise suppression we can distinguish:

- wavelet denoising;
- homomorphic filtering;
- singular value decomposition filtering;
- neural network-based denoising;
- least mean squares filter;
- spectral subtraction;
- bilinear filtering;
- non-linear noise reduction;
- time-frequency domain filtering.

In this work, wavelet transform, spectral subtraction and filtering were selected as different methods that are applied to different types of noise, and their comparison will help to choose the best one for this task.

Spectral subtraction to remove noise

Spectral subtraction is a simple but effective method of removing noise from audio signals. It is based on the assumption, that the spectrum of the noise differs from the spectrum of the useful signal.[9]

First, the spectrum of both the noisy and the clean signal is calculated. This can be done using methods such as the Fourier transform. Then the noise spectrum is determined. This can be done in various ways, for example, using a noise profile obtained from a clean segment of the signal, or assuming that the noise is concentrated in certain frequency ranges. The noise spectrum is subtracted from the spectrum of the noisy signal. This is done component by component, that is, for each frequency. Finally, a reconstructed signal is obtained from the modified spectrum using the inverse Fourier transform.

Filtering based on frequency filters is a general technique for removing noise from signals that uses specialized filters to suppress unwanted frequency components. This method is flexible and powerful. It can be applied to a variety of signal types, including audio, images, and sensor data.

First, a suitable frequency filter is selected. The type of filter depends on the type of noise and the characteristics of the signal. For example, you can use a high-pass filter to remove low-frequency noise, and a low-pass filter to remove high-frequency noise.

The filter is then applied to the noisy signal. This results in the suppression of unwanted frequency components of the noise, leaving a useful signal.

There are several types of frequency filters used to suppress noise:

- FIR (Finite Impulse Response) Filters: These filters are simple to implement and computationally efficient.

- IIR (Infinite Impulse Response) filters: These filters can provide sharper noise suppression, but they are more difficult to implement.

Adaptive Filters: These filters can automatically adapt to the characteristics of the noise, making them useful for removing non-stationary noise.

Wavelet transform to remove noise

The wavelet transform is a powerful signal analysis and processing technique that can be used to remove noise from various types of data, including audio, images, and sensor data.[10]

Unlike traditional filtering techniques that work in the frequency domain, the wavelet transform uses time-localized functions called wavelets to analyze the signal at different scales. This allows it to effectively remove noise that has a local time structure without affecting the useful signal.

The noisy signal is decomposed into wavelet components using the wavelet transform. This gives an idea of the signal at different time and frequency scales.

Wavelet components likely to correspond to noise are identified. This can be done using various methods such as thresholding or statistical analysis.

The determined noise components of the wavelets are removed or modified.

A cleaned signal is recovered from the modified wavelet components using the inverse wavelet transform.

A comparative analysis of selected methods of noise filtering in audio sequences is given in Table 2.

Table 2. – Comparison of filtering and noise suppression algorithms

| | Spectral subtraction | Filtering based on frequency filters | Wavelet transform |
|--------------------|---|---|---|
| Principles of work | First, the noise spectrum is estimated, which is then subtracted from the signal spectrum to reduce the noise. | Uses filters to select certain frequency components of the signal. Band-pass, high-pass, or low-pass filters are often used to remove noise. | Breaks the signal into components of different scales or levels. These components can be analyzed and modified to remove noise. |
| Advantages | <p>Simplicity: Easy to implement and understand.</p> <p>Performance for stationary noise: Works well for removing continuous, stationary noise.</p> <p>Removes noise without significantly changing the spectral structure of the</p> | <p>Ease of implementation: Widely used and easily implemented using DSP (Digital Signal Processing) libraries.</p> <p>Performance: Works well for removing noise in specific frequency ranges, such as low-frequency hum or high-frequency noise.</p> | <p>Allows you to analyze the signal at different scales, which helps remove both high-frequency and low-frequency noise.</p> <p>Works well with non-stationary signals: Effective for processing signals with variable frequency characteristics.</p> |

| | | | |
|---------------|--|--|--|
| | signal. | Frequency Band Control: Allows you to fine-tune the frequency bands to be kept or deleted. | Wavelets provide good locality in time and frequency, which helps preserve important details of the signal. |
| Disadvantages | <p>Residual Noise: May leave artifacts known as musical tones.</p> <p>Sensitivity to noise estimation: Incorrect estimation of the noise spectrum can degrade the quality of the reconstructed signal.</p> <p>Not good for non-stationary noise: Does not work well with time-varying noise.</p> | <p>Useful signal losses: Can remove useful frequencies along with noise, especially if the noise and useful signal frequencies overlap.</p> <p>Poor performance for broadband noise: Limited performance for noise covering a wide frequency range.</p> <p>Can cause phase distortion: Incorrect filter settings can cause phase distortion in the signal.</p> | <p>Complexity: More complex to implement compared to simple methods such as filtering.</p> <p>Wavelet selection: Requires correct selection of wavelet type and decomposition level, which may not be obvious.</p> <p>Computational cost: May require significant computational resources, especially for large signals or high levels of decomposition.</p> |

Each method has its advantages and disadvantages, making them suitable for different signal types and noise conditions. Spectral subtraction is effective for frequency noise isolation, filtering is useful for basic noise reduction in simple conditions, while wavelet transform provides the best signal quality in complex and non-uniform noise environments.

AIMS AND TASKS OF THE WORK

The main goal of the article is to study the impact of noise suppression methods on the quality of restoration of an audio signal that was alternately noisy with one of five types of noise - white, pink, brown, impulse, Gaussian with different power.

To achieve the set goal, the following tasks must be solved:

- comparative analysis of types of noise in an audio file, noise reduction methods and filtering methods;
- creation of a working dataset for further research;
- development of the methodology of the experiment;
- performing a study of the effect of spectral subtraction, frequency filtering and wavelet transformation on the quality of audio file recovery;
- analysis of the obtained results.

The conducted experiments are the basis for further research on the influence of filtering and noise suppression methods on the accuracy of speech and voice recognition based on neural network models.

RESULTS AND DISCUSSION

The methodology for conducting the experiment, necessary to achieve the goal, is as follows - first, a working dataset was prepared by noise-free input audio files. Each of the noises had two different variants - powerful and not powerful. To determine the noise power, we will use the value of the signal-to-noise ratio (SNR). Not powerful noise, this is the kind of noise with an SNR value close to 50db. It can vary depending on the type of noise. Powerful noise is noise with a negative SNR value, i.e. noise with a power slightly greater than the useful signal. This is not done for impulse noise, due to its peculiarities, when the noise power increases, the SNR value does not increase significantly.

The created working dataset for the research has the following structure:

- 25 noise-free audio files;
- 250 noisy audio files (one of five types of noise - white, pink, brown, impulse, Gaussian with different power) is applied to each of the noiseless ones.

The audio signals will then be pre-processed using various denoising and filtering algorithms, such as spectral subtraction, wavelet transform and band-pass filtering. After that, the processed signals will be analyzed, and the noise removal quality will be measured. The results of the experiments will be evaluated using the signal-to-noise ratio and peak signal-to-noise ratio (PSNR) metrics. For each of the noises, non-powerful noise (with a high positive SNR

in the uncleaned file) and powerful noise (with a negative SNR value) will be taken. The step-by-step

model is visualized in the (fig. 2).

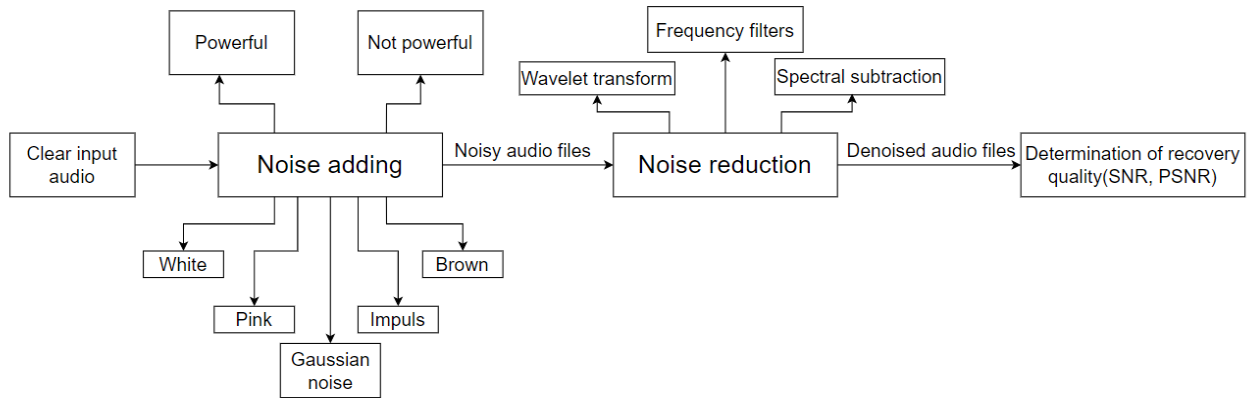


Figure 2 – Functional diagram of the proposed system

SNR, or signal-to-noise ratio, is a metric used to compare the level of a useful signal to the level of background noise. This metric is usually measured in decibels. A higher SNR value indicates that the signal is much stronger compared to the noise, resulting in better signal reception and processing. It depends on the ratio of signal power to noise.[11]

PSNR is commonly used in audio, image and video signal processing. In the context of audio processing, PSNR helps determine the degree to which audio is distorted after certain processes, such as compression or passing through noisy channels. It

depends on the square of the maximum value of the amplitude and the root mean square error between the original and the processed signal. A normal PSNR level for further audio work is generally considered to be between 20 and 50 dB, depending on the specific application and audio quality requirements. At 20dB, the sound may contain noticeable distortion, but can still be understood and used in less demanding applications. These are standards for telephone communication where some level of noise and distortion is acceptable. Results are shown in table 3.

Table 3. – Data subsets

| Experiment | SNR before (Db.) | Spectral subtraction | | Frequency filters | | Wavelet transform | |
|--------------------|------------------|----------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | | SNR after (Db.) | PSNR(Db.) | SNR after (Db.) | PSNR(Db.) | SNR after (Db.) | PSNR(Db.) |
| White not powerful | 28.86 | 33.67 | 52.82 | -21.35 | -2.19 | 30.18 | 49.34 |
| White powerful | -3.16 | 5.35 | 24.50 | -21.41 | -2.25 | 3.91 | 23.07 |
| Pink not powerful | 55.61 | 55.35 | 74.50 | -20.72 | -1.56 | 56.25 | 75.42 |
| Pink powerful | -4.78 | 3.50 | 22.64 | -21.41 | -2.25 | -2.95 | 16.21 |
| Gauss not powerful | 74.53 | 67.77 | 86.92 | -17.95 | 1.21 | 67.01 | 86.17 |
| Gauss powerful | -0.67 | 7.70 | 26.85 | -21.40 | -2.24 | 6.12 | 25.28 |

| | | | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Impulse not powerful | 84.93 | 68.18 | 87.32 | -18.13 | 1.03 | 68.96 | 88.13 |
| Impulse powerful | 76.45 | 68.04 | 87.19 | -18.04 | 1.12 | 67.68 | 86.84 |
| Brown not powerful | 12.42 | 21.07 | 40.22 | -21.40 | -2.24 | 12.43 | 31.59 |
| Brown powerful | -1.86 | 2.38 | 21.52 | -21.44 | -2.28 | -1.85 | 17.31 |

Analysis of the obtained results showed that filtering based on frequency filters only worsened the output signal, that is, not only noise was filtered, but also useful information. In all runs, the SNR deteriorated to -18 - -22dB, which is worse than without filtering. The possible reason for this is an

error in the selection of the filter, but to change this, you need to use other algorithms, such as adaptive filters, which will help preserve the useful information of the audio file. A comparison of solutions is shown in (fig. 3) and (fig 4).

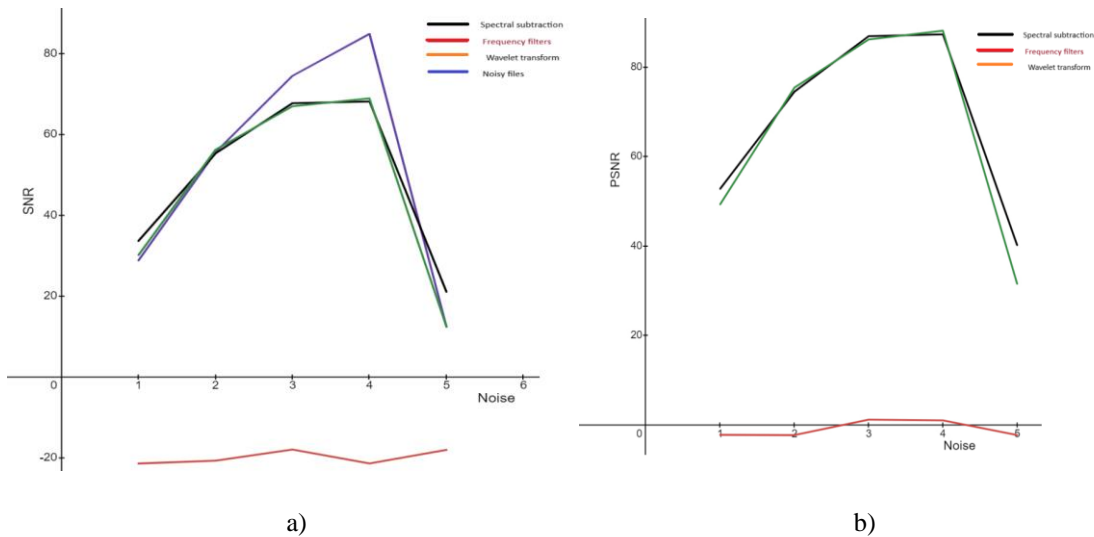


Figure 3 – Graphs of changes in values for weak noise a) SNR, b) PSNR

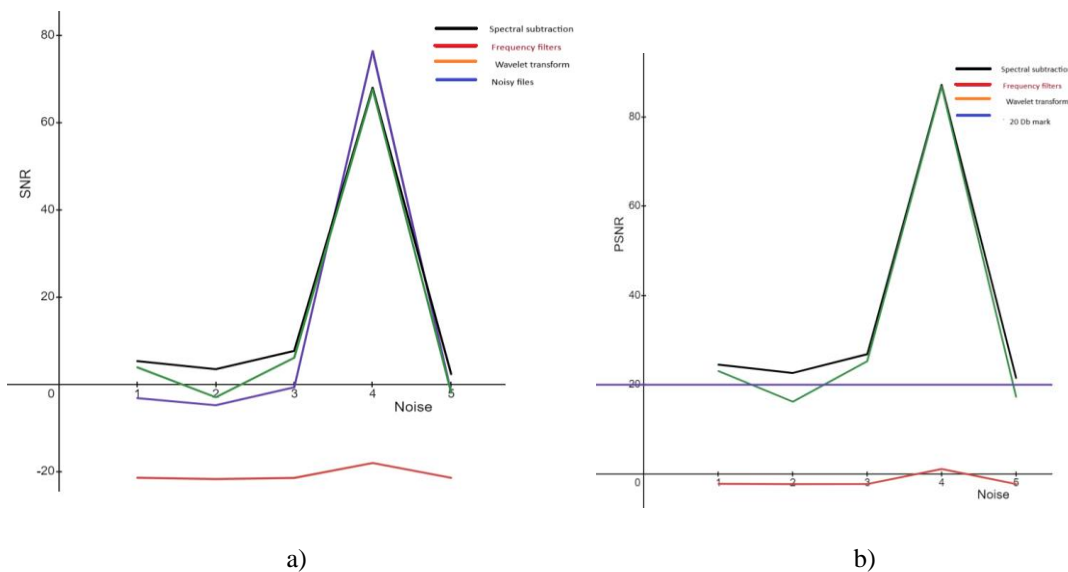


Figure 4 – Graphs of changes in values for powerful noise a) SNR, b) PSNR

Comparing the SNR values for low-power noise, we can see that the algorithms give approximately non-variable data. They find in the range from -20% to +15% depending on the type of noise. When analyzing the values for powerful noises, we see a change from a negative value to a positive one, which means that the useful signal began to dominate the noise. The average value changed by 280% (not including the impulse noise, because its SNR values were not negative).

Comparing spectral subtraction and wavelet transformation, we can conclude that both algorithms improve audio quality and increase SNR. In addition, even with powerful noises, they have a fairly high PSNR. However, we can see that with the powerful brown and powerful pink wavelet, the transformation failed to raise the PSNR level to the recommended 20dB, so we will consider spectral subtraction more suitable for further work.

Conclusions

In this paper a comprehensive analysis of the impact of the use of noise reduction and filtering on the quality of processing noisy audio files was carried out. As part of the research, it was possible to achieve the set goals and solve the set tasks.

A detailed study and comparison of filtering, spectral subtraction, and wavelet transform algorithms was conducted. This made it possible to determine which techniques are best suited for noisy audio data.

Different types of noise have been classified as white noise, pink noise, brown noise, Gaussian noise and impulse noise.

As a result, we found that filtering based on frequency filters only worsened the output signal, that is, not only noise is filtered, but also useful information. In all runs, the SNR deteriorates to -18 - -22dB, which is worse than without filtering.

Algorithms of spectral subtraction and wavelet transformation improved SNR parameters and output audio files noisy with the most powerful noises in the range of 20dB, which can be considered acceptable for further processing. The results highlight the importance of using denoising and filtering for complex audio processing tasks, particularly neural network training tasks.

Considering the obtained results, it is possible to recommend spectral subtraction as the most effective tool for solving the given problem, especially when the appropriate computing resources are available. However, wavelet transforms remain a reliable option.

This study made it possible to use for training neural networks not only audio files without noise, but also with them. This will increase the sample of available input and test data for further research.

The scientific value of the work lies in deepening the understanding of the mechanisms underlying noise reduction and filtering and their impact on audio data processing. The presented conclusions can serve as a

basis for further research in the field of machine learning and the development of intelligent systems, which will contribute to progress in the field of artificial intelligence.

References

1. MALIK, Mishaim, et al. Automatic speech recognition: a survey. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80: 9411-9457.
2. KUMAR, Yogesh; KOUL, Apeksha; SINGH, Chamkaur. A deep learning approaches in text-to-speech system: a systematic review and recent research perspective. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 82.10: 15171-15197.
3. HAN, Wei, et al. Contextnet: Improving convolutional neural networks for automatic speech recognition with global context. *arXiv preprint arXiv:2005.03191*, 2020.
4. Barkovska O., Havrashenko A. Analysis of the influence of selected audio pre-processing stages on accuracy of speaker language recognition // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. – 2023. – №. 4 (26). – С. 16-23. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.26.016>
5. Havrashenko A., Barkovska O. Analysis of text augmentation algorithms in artificial language machine translation systems // *Advanced Information Systems*. – 2023. – Т. 7. – №. 1. – С. 47-53. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.08>
6. Barkovska O., Havrashenko A. Analysis of word search algorithms in the dictionaries of machine translation systems for artificial languages // *Computer systems and information technologies*. – 2023. – №. 2. – С. 17-24. <https://doi.org/10.31891/csit-2023-2-2>
7. DUBEY, Harishchandra, et al. *Icassp 2023 deep noise suppression challenge*. *IEEE Open Journal of Signal Processing*, 2024.
8. PATIDAR, Pawan, et al. Image de-noising by various filters for different noise. *International journal of computer applications*, 2010, 9.4: 45-50.
9. KARAM, Marc, et al. Noise removal in speech processing using spectral subtraction. *Journal of Signal and Information Processing*, 2014, 2014.
10. KUMAR, Ashish, et al. Stationary wavelet transform based ECG signal denoising method. *ISA transactions*, 2021, 114: 251-262.
11. DARRAS, Kevin FA, et al. High microphone signal-to-noise ratio enhances acoustic sampling of wildlife. *PeerJ*, 2020, 8: e9955.

Дослідження впливу методів шумопригнічення на якість відновлення аудіосигналів

Барковська Олеся, Гаврашенко Антон

Анотація.

Предметом дослідження є аналіз різних алгоритмів фільтрації на якість результуючих аудіо файлів. Значущість фільтрації аудіо ряду помітно зросла в останні роки завдяки її ключовій ролі в різноманітних застосуваннях, таких як зменшення розпізнавання мови та штучний інтелект. З урахуванням зростаючого попиту

на рішення задач пов'язаних з розпізнаванням мови, обробки аудіо ряду стає важливою для визначення точності та ефективності отриманого рішення.

Метою роботи є дослідження впливу методів шумопригнічення на якість відновлення аудіосигналу, що попередньо був зашумлений одним із п'яти видів шумів - білий, рожевий, коричневий, імпульсний, гаусівський із різною потужністю. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **завдання**: було проведено аналіз типів шумів та аналіз методів шумоподавлення та фільтрування, а також було розроблено узагальнену модель шумоподавлення та фільтрування і сплановано експеримент у залежності від типу та потужності шуму. Моделювання експерименту виконано шляхом порівняння параметрів співвідношення сигнал/шум до та після експерименту та пікове співвідношення сигналу до шуму в обробленому файлі. Використані такі **методи**: спектральне віднімання, фільтрація на основі частотних фільтрів та вейвлет-перетворення.

Отримані наступні **результати**: у залежності від обраних шумів та алгоритмів, вдалося досягти найнижчого значення пікове співвідношення сигналу до шуму у 21.52дб, та збільшувало співвідношення сигнал/шум що дозволило подальшу роботу з цими аудіофайлами. Практичною значущістю даної роботи є збільшення кількості доступних аудіо файлів для подальшої роботи.

Висновки:

Аналіз отриманих результатів показав, що фільтрація на основі частотних фільтрів лише погіршувала вихідний сигнал, тобто фільтрувалася не лише шум, а і корисна інформація. У всіх запусках SNR погіршувався до -18дб, що гірше ніж без фільтрування. Алгоритми спектрального віднімання та вейвлет

перетворення покращили параметри SNR та вивели аудіофайли зашумлені найпотужнішими шумами у діапазон від 20дБ, що може вважатися сприятливим для подальшої обробки. Результати підкреслюють важливість використання шумоподавлення та фільтрування для складних завдань обробки аудіо, зокрема у задачах навчання нейромереж.

Ключові слова: шумопригнічення, фільтрація, аудіо, шум, SNR, PSNR, спектральне віднімання, частотні фільтри, вейвлет перетворення, експеримент.

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Барковська Олеся Юріївна - кандидат технічних наук, доцент кафедри "Електронно обчислювальних машин", Національний університет радіоелектроніки «ХНУРЕ», Харків, Україна;

Гаврашенко Антон Олегович – асистент кафедри "Електронно обчислювальних машин", Національний університет радіоелектроніки «ХНУРЕ», Харків, Україна;

Barkovska O. – Ph.D (Engineering Sciences), Docent, Associate Professor Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Havrashenko A. – Professor Assistant at Department of Electronic Computer, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

e-mail: anton.havrashenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8802-0529>

UDC 004.93

DOI: 10.18664/ikszt.v29i3.313703

Vladyslav Kholiev

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

CONCEPTUAL MODEL OF THE TECHNOLOGY FOR CALCULATING THE SIMILARITY THRESHOLD OF TWO AUDIO SEQUENCES

Abstract. The paper is focused on the pressing **problem** of speaker verification by means of voice time series comparison. The **aim** of this paper is to determine the orders of mel-frequency cepstral coefficients that most accurately describe the difference between an authentic voice and an artificially generated copy for their further use as input to a neural network model in a resource-limited environment. To achieve this goal, the following **tasks** were accomplished: a conceptual model of the technology for determining the similarity threshold of two audio series was developed; the orders of fine-frequency cepstral coefficients with the most characteristic differences between the recording and the generated voice were determined on the basis of neural network analysis; an experimental study of the dependence of the execution time and computational load on the created feature vector when assessing the degree of similarity of two time series was conducted; and the optimal similarity threshold was determined on the basis of the chosen dataset. The developed model of the technology for determining the similarity threshold was tested on a dataset that is a combination of the DEEP-VOICE dataset and our own dataset. The demonstrated result of applying the developed technology showed an increase of 43% when using the specified MFCCs compared to using all of them. Based on experimental studies, the DTW acceptance threshold was set at 0.37.

Key words: machine learning; mfcc, dtw, feature extraction, speaker recognition; classification, voice cloning, siamese neural networks.

Introduction

In recent years, the development of smart technologies, in particular the field of generative artificial intelligence (AI), has been gaining speed. Together with the development of computing power, this has ensured high availability and, consequently, the prevalence of AI-based services.

These services are used in many areas, such as natural text processing, audio-visual promotional materials generation, smart prompts when writing program code, personalized chatbots for consulting and support services, as well as text-to-speech (TTS) and voice cloning (Figure 1).

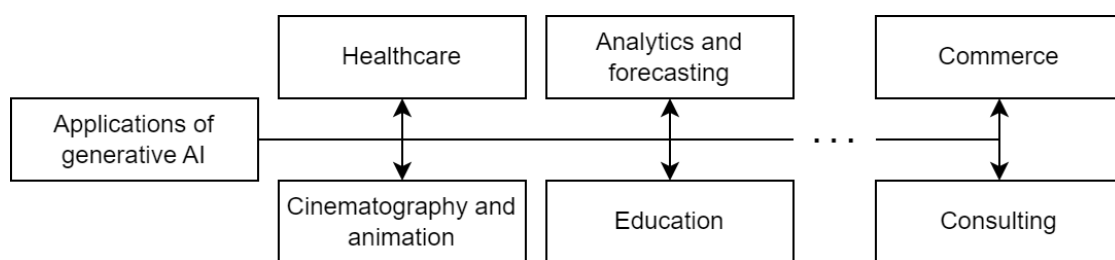


Figure 1 – Applications of generative artificial intelligence.

In particular, TTS with the use of cloned voice, or real-time cloning, has such applications as:

- personalized voice assistants for personal and commercial use in many areas;
- cloning the voice of people with speech impediments or injuries of the speech apparatus in medicine;
- reducing the cost of re-shooting takes, voice acting for animated characters, as well as digital doubles of live actors in cinema and animation;

© Vladyslav Kholiev 2024

- personalization and improvement of learning conditions for people with visual impairments and special learning needs [1];

At the same time, cases of impersonation of users and their various characteristics (voice, face, etc.) have significantly increased, and their severity is also growing. Static photos and voice are faked especially often to fabricate events involving or authenticate themselves as victims of fraud.

Voice falsification is the most accessible, and therefore the most widespread form of identity fraud.

In system of knowledge exchange of young scientists presented in [2] (Figure 2), user voice data plays a key role, as the system has the functionality of audio and video conferencing, and also authenticates users using voice.

When considering the functionality of the system in each mode, it is important to understand what the inputs and outputs of each mode are:

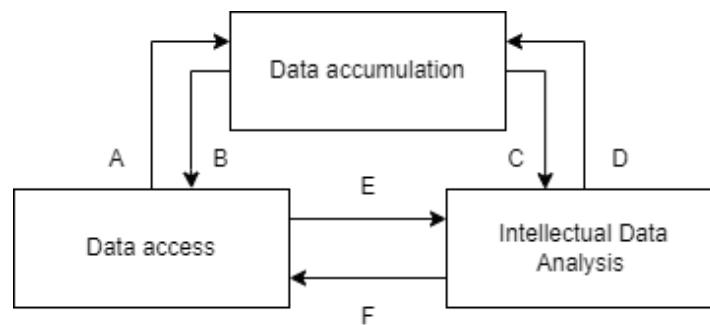


Figure 2 – Functional diagram of the proposed system of knowledge exchange of young scientists.

- marker A: data is accumulated in the form of user voice data for further training, as well as in the form of electronic documents of scientific papers for vectorization and further clustering of papers similar in topic.
- marker B: the repository subsystem receives various requests: for access to scientific papers in various forms, for user data and metadata (for example, for the subsystem that provides social rooms), as well as requests for verification and identification of users.
- marker C: the relevant modules receive voice data for training, or classification and research documents for further vectorization and clustering.
- marker D: as a result of the analysis mode, neural network models are trained on the basis of voice data and their weights are saved to the repository, and based on the uploaded research documents, their vectorized representation is formed and saved, and the documents themselves are assigned to a group with similar topics.
- marker E: if there is a need to identify or verify users, requests are sent with the relevant data (user ID(s) and/or conference IDs, etc.);
- marker F: in response to the queries, either individual neural networks or a pseudo-ensemble module is deployed based on the stored weights of the trained networks.

Thus, improving the recognition of cloned generated voice is a high priority to reliably authenticate users and maintain their security and the integrity of their data.

In general, several approaches are used to solve the problem of comparing data in the context of binary comparison (“equals” or “not equals”) (Figure 3), such as: neural network (the decision is made using a neural network model), algorithmic or traditional (the result is obtained as a result of the algorithm of logical and mathematical comparison of part or all data), and mixed (the previous two approaches are combined in varying percentages).

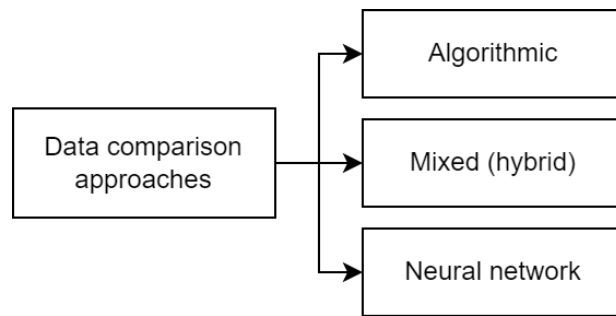


Figure 3 – Generalized classification of approaches to data comparison.

The solution proposed in this paper is a hybrid one, i.e., it combines traditional and neural network methods.

Standard audio sequences classification pipelines usually include the following steps:

- Speech segment detection;
- Pre-processing (silence removal, noise filtering, etc.);
- Feature extraction;
- Audio sequence analysis based on the obtained features and assignment to one of the classes;
- Optional post-processing.

The feature extraction stage is extremely important, as it has the greatest impact on the accuracy of audio classification. The most common methods include:

- spectrograms;
- mel-frequency cepstral coefficients (MFCC);
- constant-Q transform (CQT);
- continuous wavelet transform (CWT);
- and others.

The analysis of [1,3-5] showed that MFCCs are less sensitive to background noise and amplitude variations than similar methods, and also show high efficiency in speech recognition. These advantages ensure the widespread use of mel-frequency cepstral coefficients in various practical areas of life (Figure 4).

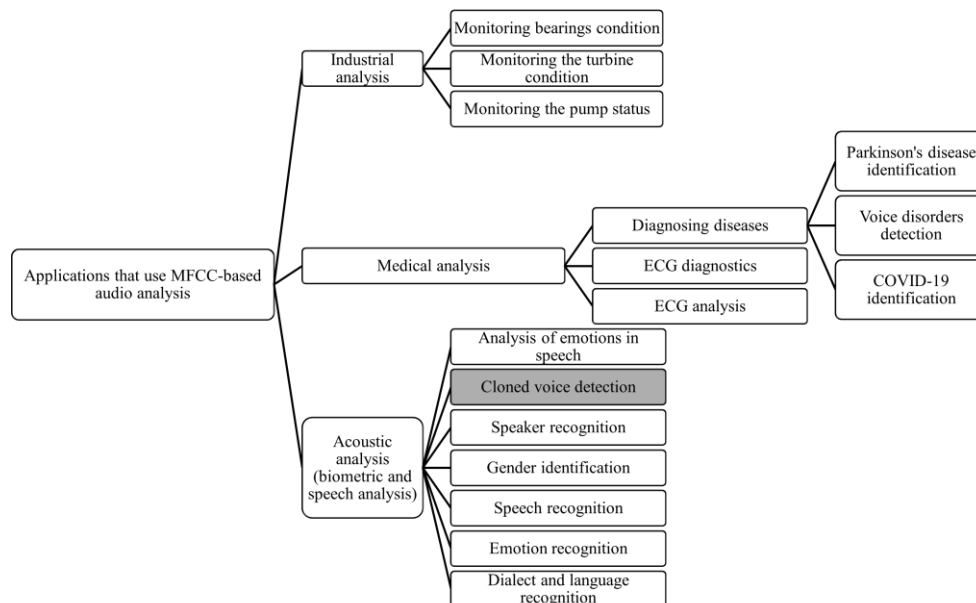


Figure 4 – Practical applications based on MFCC.

Therefore, further research is focused on the use and study of mel-frequency cepstral coefficients to solve the problem.

The identified features are the basis for further analysis of the audio sequence or comparison of two (or more) audio sequences. The result of comparing two audio sequences based on the extracted features is a proximity score, which can be determined using metrics such as:

- Jaccard's coefficient;
- Euclidean distance;

- Hamming distance;
- Pearson correlation coefficient;
- Signal to noise ratio (SNR/PSNR);
- Dynamic Time Warping (DTW).

Among them, DTW stands out for its relatively low computational complexity ($O(n)$ with low order of n), as well as adaptability to work with time series [6-7].

The aim of this work is to determine the orders of the mel-frequency cepstral coefficients that most accurately

describe the difference between an authentic voice and an artificially generated copy for their further use as input to a neural network model under limited resources. To achieve this goal, the following tasks must be performed:

- to develop a conceptual model of the technology for calculating the threshold of similarity between two audio orders;
- based on the neural network analysis, determine the orders of the mel-frequency cepstral coefficients with the most characteristic differences between the recording and the generated voice;
- to conduct an experimental study of the dependence of the execution time and computing unit load on the created vector of characteristic features when assessing the degree of similarity of two time series;

- determine the optimal threshold of similarity based on the use of the DTW algorithm in the context of the selected dataset;
- analyze the obtained results.

To accomplish these tasks, a method of analyzing voice information based on a hybrid approach of neural network and algorithmic analysis was proposed.

Results an discussion

In this paper, a hybrid technology for analyzing voice information is proposed based on a combination of neural network analysis of mel-frequency cepstral coefficients and their comparison using the dynamic time warping (DTW) algorithm. The conceptual model of the technology for determining the threshold of similarity between two audio sequences is shown in Figure 5.

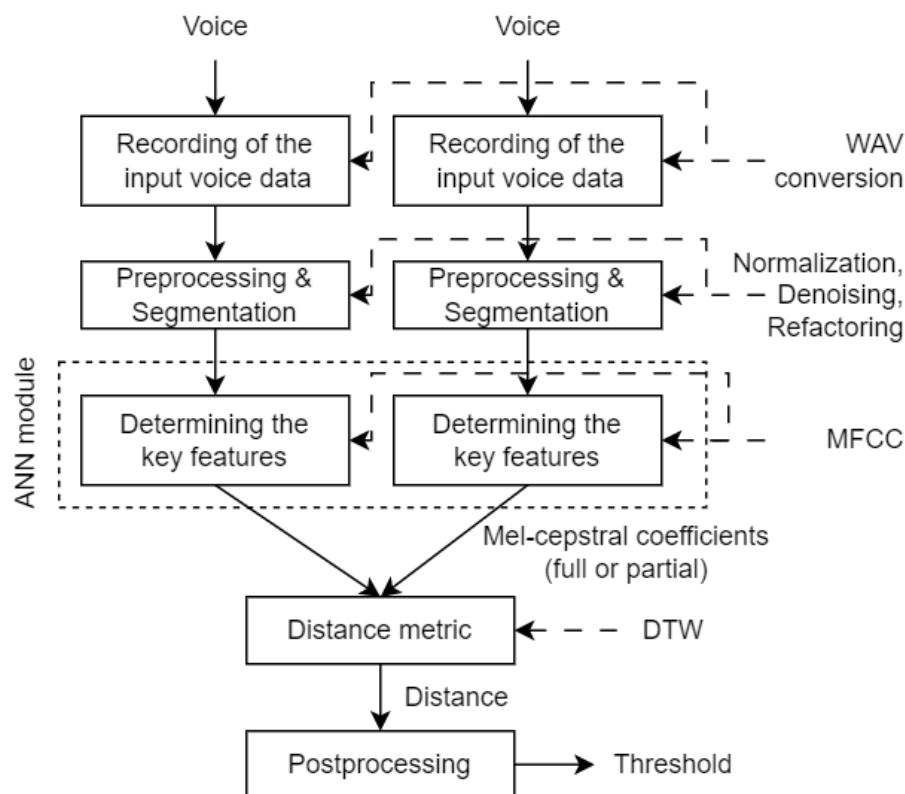


Figure 5 – The conceptual model of the technology for determining the threshold of similarity between two audio sequences.

In this work, a combination of own dataset, formed from own audio recordings and cloned audio sequences, and DEEP-VOICE dataset, presented in [8] and developed for a related topic, is used. DEEP-VOICE consists of recordings from public speeches of famous individuals (Table 1), as well as cloned audio sequences generated using the open text-to-speech framework “Retrieval-based-Voice-Conversion-WebUI” [9].

The cloned audio sequences repeat the texts of other recordings, but are spoken in the voice of each individual. In total, the dataset includes 64 audio sequences - 8 real recordings and 56 generated audio files. The length of the recordings is limited to 10 minutes. The recordings have varying degrees of recording quality and background noise levels to represent real-world conditions and to ensure the diversity of the dataset. There are recordings of both men and women, but the dataset is not balanced.

Table 1.

The data collected for training, validation, and testing for the experiments in [6] (sorted alphabetically by last name). Audio fragments truncated to ten minutes.

| Individual | Source | Length (MM:SS) |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| Joe Biden | Victory Speech | 10:00 |
| Ryan Gosling | Golden Globes Speech | 1:33 |
| Elon Musk | Commencement Speech | 10:00 |
| Barack Obama | Victory Speech | 10:00 |
| Margot Robbie | BAFTAs Speech | 1:19 |
| Linus Sebastian | Stepping Down Monologue | 9:30 |
| Taylor Swift | Women in Music Speech | 10:00 |
| Donald Trump | Victory Speech | 10:00 |
| Total | | 62:22 |

Own dataset, combined with the one mentioned above, has a similar structure, namely, it consists of recordings of the same texts together with generated audio sequences of similar texts. In total, there are 16 audio files in this subset.

The resulting dataset was split into training and test samples in the ratio of 80/20 [10] and the k-fold cross validation method was applied.

One of the key features of the proposed technology is the stage of identification and selection of key features after their extraction. Since the features are represented by mel-frequency cepstral coefficients, this means that in this context, the identification of key features is the identification of individual orders of coefficients that best describe the features of the audio signal that

distinguish the authentic voice from the generated copy, for their further use in a certain proximity measure using one of the metrics. Narrowing the number of features used will reduce the time for comparing two audio sequences, as well as reduce the computational load of the technology, which is an advantage when computer resources are limited.

Key features are identified using so-called Siamese neural networks and DTW is used as a proximity measure.

Siamese neural networks are a specialized architecture that usually consists of two parallel identical neural networks that have the same weights in order to evaluate or compare the similarity between two input objects [11] (Figure 6).

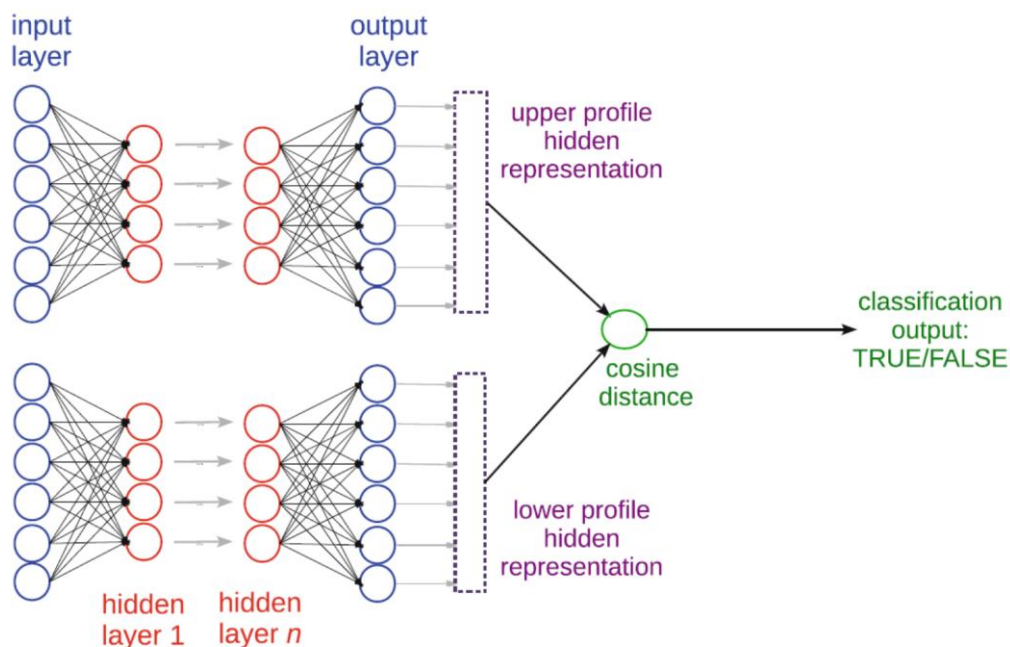


Figure 6 – Generalized architecture of the Siamese neural network.

Such a neural architecture is able to learn from a limited data set by generalizing information about

feature vectors represented as MFCCs. In this work, one of the models in the pair will be trained on

authentic voices, while the other will be trained on cloned copies. As a result, both models will provide generalized mel-frequency cepstral coefficients for authentic and cloned voices, respectively.

Usually, for such architectures, the cosine similarity coefficient is used as a measure of proximity, but due to the peculiarities of the input and output data, i.e. MFCC, it is appropriate to use DTW. The returned

values are indices corresponding to the orders of the mel-frequency cepstral coefficients.

The coefficients used for further determination of proximity were those with a DTW distance of at least 0.37.

The results of the analysis are shown in Table 2. The average length of an audio sequence is 600 seconds.

Table 2. – *The dependence of execution time and computing unit load on the created vector of characteristic features when assessing the degree of similarity of two time series*

| Experiment number | A degree of proximity (DTW metric) | Average DTW value | Proximity calculation time, m:s | Computing unit load, % |
|--|------------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------------|
| Comparison of audio sequences using all MFCC orders for identical voices | | | | |
| 1 | 0.35 | 0,33 | 6:57 | 88% |
| 2 | 0.33 | | 7:04 | 89% |
| 3 | 0.36 | | 6:43 | 89% |
| 4 | 0.34 | | 7:15 | 88% |
| 5 | 0.37 | | 5:04 | 89% |
| 6 | 0.27 | | 4:35 | 88% |
| 7 | 0.30 | | 7:01 | 87% |
| Comparison of audio sequences using all MFCC orders for different voices | | | | |
| 8 | 0.42 | 0,55 | 7:54 | 88% |
| 9 | 0.38 | | 8:44 | 89% |
| 10 | 0.63 | | 7:33 | 88% |
| 11 | 0.59 | | 9:15 | 88% |
| 12 | 0.48 | | 6:54 | 89% |
| 13 | 0.71 | | 6:15 | 89% |
| 14 | 0.66 | | 9:20 | 88% |
| Comparison of audio sequences using partial (predefined) MFCC orders for identical voices | | | | |
| 15 | 0.32 | 0.33 | 3:18 | 77% |
| 16 | 0.34 | | 2:15 | 65% |
| 17 | 0.35 | | 2:22 | 71% |
| 18 | 0.38 | | 2:42 | 68% |
| 19 | 0.29 | | 3:16 | 74% |
| 20 | 0.28 | | 2:55 | 69% |
| 21 | 0.35 | | 3:15 | 70% |
| Comparison of audio sequences using partial (predefined) MFCC orders for different voices | | | | |
| 22 | 0.55 | 0.54 | 2:45 | 76% |
| 23 | 0.41 | | 3:51 | 77% |
| 24 | 0.68 | | 3:22 | 68% |
| 25 | 0.46 | | 3:24 | 69% |
| 26 | 0.54 | | 2:59 | 70% |
| 27 | 0.61 | | 3:55 | 64% |
| 28 | 0.53 | | 2:51 | 71% |

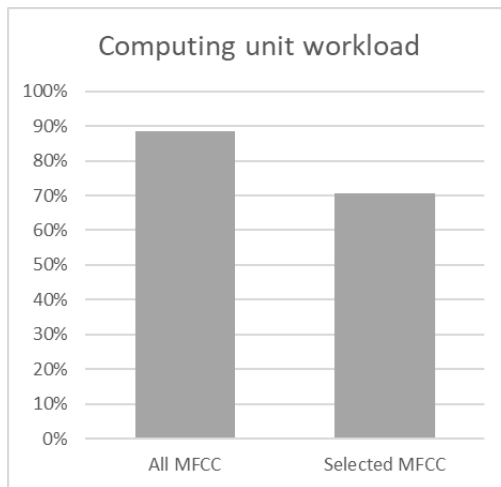
As a result of the neural network analysis, the coefficients that had the greatest difference when comparing the generalized coefficients obtained as a result of training the Siamese neural network for authentic and cloned voices were identified.

For further comparison and final proximity measure threshold determination, the DTW method was used

again. It compares the audio sequences based on the selected coefficients. To make the final decision, it is necessary to determine the optimal similarity threshold in the context of the selected dataset. The threshold was chosen according to the following principle: among the distance indicators for pairs of real voices, the average DTW of 0.33 was chosen. Meanwhile, the

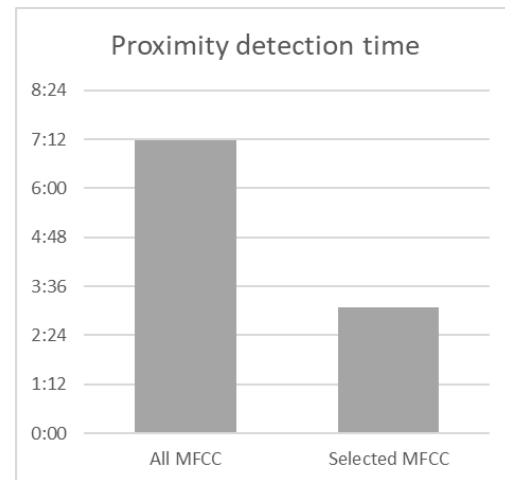
minimum value of 0.395 was taken for the distance indicators of different votes.

The resulting threshold is the arithmetic mean of the two indicators, which is 0.37. This threshold will be used in further research.



(a) computing unit load

Figure 7 – Graphs of the dependence of the proximity determination time and the computing unit load on the number and composition of mel-frequency cepstral coefficients.



(б) proximity detection time

Further development includes the application of the obtained parameters and characteristics to the neural network model in order to develop a speaker verification module or improve its performance.

Table 2 and the graphs in Figure 7 show that at close values of the acceptance threshold, the technology of using partial MFCCs shows a significant increase in execution speed (43%) due to the reduction in computational complexity due to the absence of complications in the Siamese network architecture and the reduction of data to be processed. Further use of the selected MFCC coefficients is appropriate in the context of determining voice authenticity based on the metric of proximity to the cloned audio recording.

Conclusions

In this paper, a conceptual model of the technology for calculating the similarity threshold of two audio sequences was proposed. The technology is based on a mechanism for determining significant orders of mel-frequency cepstral coefficients to reduce the dimensionality of input data and, as a result, reduce the execution time and computing unit load, which is an advantage in conditions of limited resources. The dynamic time warping algorithm was chosen as a measure of proximity because of its relatively low computational complexity and adaptability to work with time series.

The obtained results show a significant increase in the speed of execution (43%) due to the reduction of computational complexity due to the absence of complications in the Siamese network architecture and the reduction of data for processing. Further use of the selected MFCC coefficients is appropriate in the context of determining voice authenticity based on the metric of proximity to the cloned record.

References

- Sidhu, Manjit & Latib, Nur & Sidhu, Kirandeep. (2024). MFCC in audio signal processing for voice disorder: a review. *Multimedia Tools and Applications*. 1-21. 10.1007/s11042-024-19253-1.
- Холев В., Барковська О. COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS FOR THE PROBLEM OF SPEAKER RECOGNITION //СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ. – 2023. – №. 2 (24). – С. 172-178.
- Zheng, Fang & Zhang, Guoliang & Song, Zhanjiang. (2001). Comparison of Different Implementations of MFCC.. *J. Comput. Sci. Technol.*. 16. 582-589. 10.1007/BF02943243.
- Dave, Namrata. (2013). Feature extraction methods LPC, PLP and MFCC in speech recognition. *International Journal For Advance Research in Engineering And Technology*(ISSN 2320-6802). Volume 1.
- Sharma, Garima & Umopathy, Kartikeyan & Krishnan, Sridhar. (2020). Trends in audio signal feature extraction methods. *Applied Acoustics*. 158. 107020. 10.1016/j.apacoust.2019.107020.
- Abdullah Mueen, Eamonn J. Keogh: Extracting Optimal Performance from Dynamic Time Warping. *KDD 2016*: 2129-2130

18. Yurika Permanasari et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1366 012091
19. Bird, J. J., & Lotfi, A. (2023). Real-time Detection of AI-Generated Speech for DeepFake Voice Conversion. arXiv preprint arXiv:2308.12734.
20. Retrieval-based-Voice-Conversion-WebUI. (n.d.). github.com. <https://github.com/RVC-Project/Retrieval-based-Voice-Conversion-WebUI/>
21. Kholiev, V., Barkovska, O. (2023), "Analysis of the of training and test data distribution for audio series classification", Information and control systems at railway transport, No. 1, P. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i1.276343>
22. Chicco, D. (2021). Siamese Neural Networks: An Overview. In: Cartwright, H. (eds) Artificial Neural Networks. Methods in Molecular Biology, vol 2190. Humana, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0826-5_3.

Ключові слова: machine learning; mfcc, dtw, feature extraction, speaker recognition; classification, voice cloning; siamese neural networks

About the authors / Відомості про авторів

Холєв Владислав Олександрович – асистент кафедри “Електронно обчислювальних машин”, Національний університет радіоелектроніки «ХНУРЕ», Харків, Україна;

Vladyslav Kholiev – Professor Assistant at Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics "NURE", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: vladyslav.kholiev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-1561>.

Received (Надійшла) 14.06.2024.

Концептуальна модель технології визначення порогу подібності двох аудіорядів

Vladyslav Kholiev, Olesia Barkovska

Анотація. Робота присвячена актуальній **проблемі** верифікації спікерів шляхом порівняння голосових часових рядів. **Метою** даної роботи є визначення порядків мелчастотних кепстральних коефіцієнтів, які найточніше описують різницю автентичного голосу від штучної згенерованої копії для подальшого їх використання у якості вхідних даних нейромережевої моделі в умовах обмежених ресурсів. Для досягнення цієї мети були виконані наступні **задачі**: розроблено концептуальну модель технології визначення порогу подібності двох аудіорядів, на основі нейромережевого аналізу визначено порядки мелчастотних кепстральних коефіцієнтів з найхарактернішими відмінностями запису від згенерованого голосу, проведено експериментальне дослідження залежності часу виконання та завантаженості обчислювача від створеного вектору характерних ознак при оцінюванні міри подібності двох часових рядів, а також визначено оптимальний поріг подібності на основі використання алгоритму DTW у контексті обраного датасету. Розроблена модель технології визначення порогу подібності була протестована на наборі даних, що являє собою комбінацію набору даних DEEP-VOICE та власного датасету. Продемонстрований результат застосування розробленої технології показав приріст у 43% при використанні визначених MFCC порівняно з використанням усіх. На основі експериментальних досліджень був встановлений поріг прийняття DTW у 0.37.

Komar O.M. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Lysechko V.P. – Dr Sc. Professor, leading researcher, Air Forces Scientific Center of the Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine.

Tarshin V.A. - Dr Sc. Professor, deputy head of Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force for educational work, Kharkiv, Ukraine.

Misiura O.M. - PhD, S.R.F., Chief of the Scientific Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine.

Bezverkhyi S.A. senior researcher of the Scientific Center Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine.

COMPLEX SIGNALS PARAMETERS OPTIMIZATION ON THE BASE OF LINEAR APPROXIMATIONS USING THE GRADIENT METHOD AND NEWTON'S METHOD

The article examines the effectiveness of the gradient descent and Newton methods for optimizing the parameters of ensembles of complex signals. Algorithms have been developed and implemented that increase the accuracy of setting parameters and ensure reasonable optimization of spectral, temporal and statistical characteristics of signals. The effectiveness of the application of the methods was confirmed experimentally on the example of reducing the error and increasing the level of immunity. The obtained results substantiate the improvement of the parameters of complex signals, which proves the efficiency of use for wireless telecommunication systems in order to ensure stable and reliable operation in conditions of dynamic changes in the environment and a high level of interference.

The article compares the mathematical methods of optimization, namely the gradient method and Newton's method, proposes mathematical models and constructs algorithms that empirically prove the effectiveness of the application of the studied mathematical methods in the specified scientific area - for optimizing the parameters of ensembles of complex signals. Scientific works [1-6, 9, 12] present algorithms based on the gradient method and Newton's method, but they do not consider in detail the comparative analysis of the effectiveness of these methods for optimizing the parameters of ensembles of complex signals for implementation in various scientific and practical tasks. The effectiveness of the algorithms proposed in the article was confirmed experimentally, which made it possible to reduce the error and improve the characteristics of ensembles of complex signals.

As a result of the experiments using the methods of gradient descent and Newton, a significant reduction of the error and an improvement of the stability of the signals were achieved. Newton's method reduced the error from 0.1 to 0.0027, justifying the high accuracy of setting the signal parameters. The gradient descent method provided a stable reduction of the gradient norm from 12.75 to less than 1.23, effectively reducing the interference level, i.e. increasing the interference immunity.

Keywords: linear approximations, ensembles of complex signals, gradient method, Newton's method, gradient norm, objective function, optimization of signal parameters, iterative algorithm, noise immunity.

INTRODUCTION

Researching gradient descent and Newton's methods is relevant for optimizing the parameters of complex signal ensembles because these methods provide high accuracy and efficiency in tuning spectral, temporal, and statistical characteristics of signals [1-13].

The application of these methods can significantly enhance the noise immunity of complex signal ensembles, which is critical for the functioning of wireless telecommunications systems. In the face of constant environmental changes and the presence of various interferences and obstacles,

these systems require reliable and stable operation, which can be achieved by optimizing signal parameters using adaptive algorithms such as gradient descent and Newton's method.

Solving the problem of optimizing the parameters of complex signal ensembles is essential for ensuring the efficiency and reliability of modern wireless communication systems.

The object of study is the process of optimizing the parameters of complex signal ensembles with given parameters.

The subjects of study are the algorithms and methods of optimization, particularly gradient descent and Newton's methods.

The purpose of this work is to evaluate the effectiveness of gradient descent and Newton's methods, as well as their comparative analysis with the Nelder-Mead method for optimizing the parameters of complex signal ensembles.

1 PROBLEM STATEMENT

In practice, alongside the Nelder-Mead method, which is based on a direct search algorithm and the use of a simplex to determine the main direction towards the minimum point, the gradient method is also used in scientific research. This method is an iterative search method based on the use of the gradient of the objective function to determine the optimal direction of movement. The gradient method can be effectively used to optimize a wide range of parameters of complex signal ensembles, in particular, the signal's spectral density to meet certain specified criteria such as [1, 3, 5]:

- ensemble properties of signals, namely: mean value, dispersion, and autocorrelation parameters;
- signal noise immunity properties, specifically: uniform energy distribution across frequencies or resistance to various types of interference;
- spectral characteristics of signals, such as the presence or absence of certain frequency components.

Additionally, the gradient method can be applied to optimize the temporal characteristics of complex ensemble formations:

- optimization of parameters such as time shift and pulse length, allowing control over the temporal structure of complex signals and facilitating synchronization and other aspects of data transmission;
- application of various «window functions», enabling the modification of signal waveforms, thereby reducing visual artifacts or other unwanted effects that may arise during operation and impact signal quality;
- optimization of signal filters to effectively remove frequencies that cause interference and disruptions or create artifacts, thereby significantly improving the overall quality and performance of the system.

Additional examples of using the gradient method for optimizing the parameters of complex signal ensembles include:

- optimization of modulation parameters: allows improving information transmission by adjusting the amplitude, frequency, or phase characteristics of signals to achieve better accuracy and resistance to interference;
- enhancing the energy efficiency of signals: by optimizing the energy characteristics of signals, the gradient method can help reduce the system's power consumption, which is critically important for the operation of wireless systems;
- improvement of signal synchronization: ensuring precise alignment of signals in time, which is essential for coherent signal processing and avoiding timing errors in communication systems;
- adaptive beamforming in antenna arrays: optimizing the directionality and strength of signal transmission to improve reception quality and reduce the impact of interference from unwanted directions.

The preliminary stage of the gradient method algorithm is the determination of the objective function, which takes place before the start of the iterative optimization process. For this, it is necessary to define an objective function $f(x)$ that, for example, evaluates the distance between the parameter vectors of spectral density, the target density x_{target} , and the robustness density x_{robust} . Mathematically, the formula will be as follows [1, 2]:

$$f(x) = \|x - x_{target}\|^2 + \|x - x_{robust}\|^2 \quad (1)$$

where $\| \cdot \|$ – Euclidean norm;

$x, x_{target}, x_{robust}$ – spectral density vectors.

Based on this, the gradient of the objective function will have the form [4,5]:

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial f(x_m)}{\partial x_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2(x_{target} - x) \\ \dots \\ -2(x_{robust} - x) \end{pmatrix} \quad (2)$$

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The works [1-13] analyzed within this study are devoted to the theoretical foundations and practical applications of various aspects of optimizing the parameters of complex signals using linear approximations with gradient descent and Newton's methods. Significant results have been achieved in all these studies, which enhance the understanding of the practical efficiency of different optimization methods. The studies [1, 4-6] found that the gradient method is effective for optimizing the spectral characteristics of signals, as well as for solving problems of pattern

recognition and source localization. For example, it has been established that this method reduces errors in pattern recognition and improves localization accuracy.

In the studies [2, 3, 5, 6, 13], the practical application of the Newton method justified that this method provides faster convergence compared to gradient descent, especially when optimizing the parameters of signal ensembles. It was found that the Newton method can significantly reduce the number of iterations needed to achieve an optimal solution.

The studies [7, 8] empirically confirmed the effectiveness of optimizing filter parameters using the Nelder-Mead and Levenberg-Marquardt algorithms. The differential evolution algorithm considered in [8] also showed high efficiency in optimizing synthesized signals, which in practice ensures high accuracy and stability of scientific results.

In the studies [9, 10, 11], specific methods and approaches for optimizing signals and processes were investigated. For example, [9] found that the process of signal separation based on a first-order linear complex autoregressive process is effective for improving signal quality. In [10], the feasibility of using polynomials with hybrid gradient descent and Newton's method was confirmed, which improves the convergence and accuracy of optimization. The study [11] showed that using Bregman distances for regularizing the gradient of the Newton method enhances the stability of the algorithm.

Through the analysis in study [12], the optimal total throughput for SWIPT NOMA systems was identified. This can be used to improve the efficiency of wireless telecommunication systems.

The use of the proposed methods will improve the signal characteristics and ensure a high level of noise immunity and performance in complex dynamic telecommunication systems that require high reliability and adaptation to changing environmental conditions.

The general algorithm of the gradient method is presented in Fig. 1 (without the stage of determining the objective function [7, 9]).

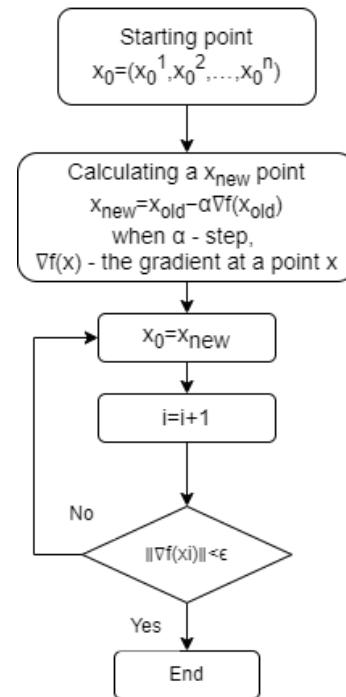


Fig. 1 – Optimization algorithm based on gradients

The generalized approach to adjusting the parameters of the gradient-based method for optimizing the signal's spectral density is presented in Table 1.

Table 1
An example of the algorithm for changing parameters based on gradients

| 3 MATERIALS AND METHODS | | |
|-------------------------|---|--|
| Iteration | Calculation | Parameter Values |
| 0 | x_0 | $x_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ |
| 1 | $x_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \eta \nabla f(x_0) = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix}$ | $x_1 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix}$ |
| 2 | $x_2 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix} - \eta \nabla f(x_1) = \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,25 \end{pmatrix}$ | $x_2 = \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,25 \end{pmatrix}$ |
| | | |
| n | $x_n = \begin{pmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n-1}^1 - \eta \nabla f(x_{n-1}) \\ x_{n-1}^2 - \eta \nabla f(x_{n-1}) \end{pmatrix}$ | $x_n = \begin{pmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \end{pmatrix}$ |

Starting with an initial value $x_0 = (1,1)$, we then determine the gradient of the objective function. In the next step, we calculate a new point x_{new} , with the condition that each such new point becomes the current value for the next iteration, and the iteration counter increases at each step of the algorithm. It is mandatory to check the stopping condition of the algorithm during the computation, specifically: if the norm of the gradient is

less than or equal to the given threshold ϵ , the algorithm stops.

4 EXPERIMENTS

Fig. 2 and Fig. 3 show an example of applying gradient-based optimization to obtain improved parameters of the signal's spectral density.

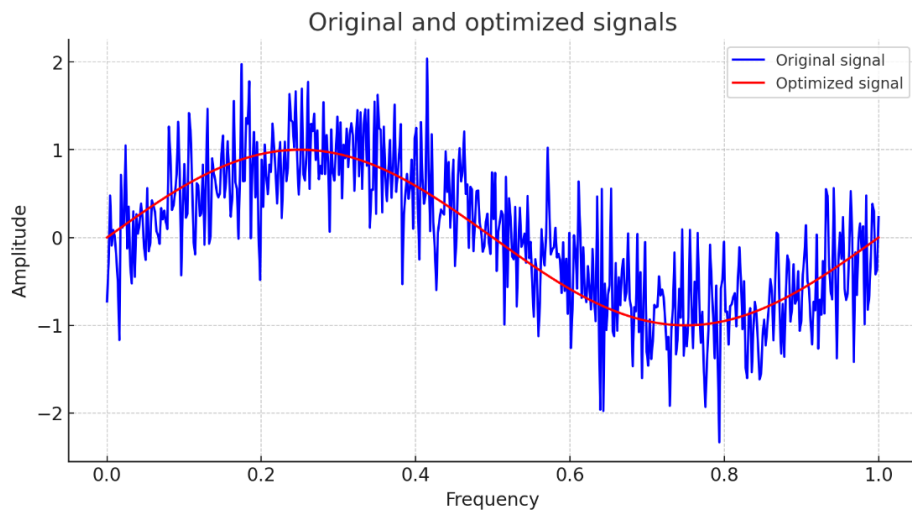


Fig. 2 – Analysis of signal changes after optimization

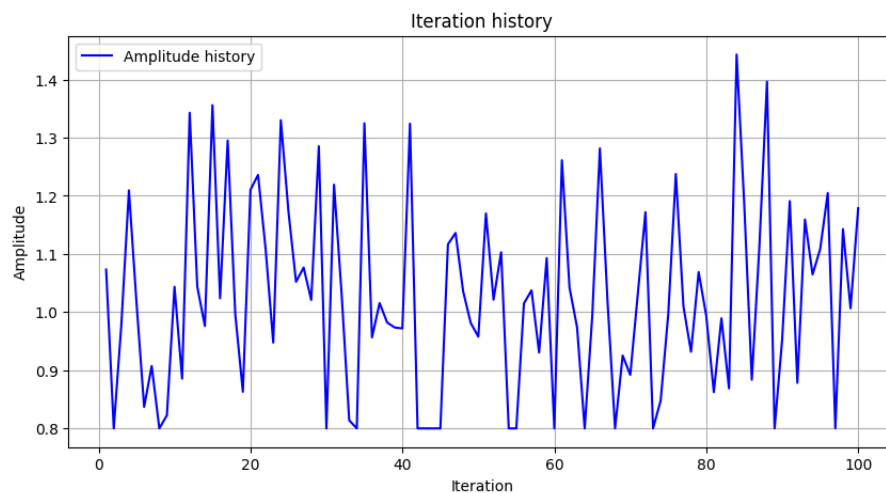


Fig. 3 – Dynamics of signal amplitude changes during iterations

Table 2 shows how the signal parameters and the gradient norm changed with each iteration. The gradient norm is a characteristic that indicates the change in the function of the gradient vector length at a specific point. In our case, the gradient norm considers how close the signal parameter optimization algorithm is to the given minimum point ϵ [9, 11].

Table 2
Dynamics of signal parameters on gradient norms by iterations

| Iteration | Signal parameters on current iteration (first 5 values, total 500 points) | Gradient norm |
|-----------|---|---------------|
| 0 | 1,13, 0,85, 1,05, 1,13, 1,38.... | 12,75 |
| 1 | 1,02, 0,76, 0,94, 1,02, 1,25 | 11,50 |
| 2 | 0,92, 0,68, 0,84, 0,92, 1,13 | 10,35 |
| 3 | 0,83, 0,61, 0,75, 0,83, 1,02 | 9,30 |
| 4 | 0,75, 0,55, 0,67, 0,75, 0,92 | 8,35 |
| | | |
| n | 0,10, 0,01, 0,20, 0,15, 0,01 | < 1.23 |

Table 3
Optimization of signal parameters by the gradient method

| Iteration | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... | 100 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Amplitude | 1,2 | 0,9 | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 0,9 | 1,1 | 1,4 | 1,2 | ... | ... |

The optimization process using the gradient method can effectively adjust the signal amplitude, improving the level of noise immunity. Changes in amplitude at each iteration indicate the process of approaching the optimal level, which helps achieve better characteristics and stability under various interference conditions. Such results are achieved by using the gradient of the objective function, which indicates the direction and magnitude of the necessary changes to improve the signal ensemble. The gradient shows how quickly and in which direction the signal ensemble parameters need to be changed to minimize the deviation from the target function value. As a result, the amplitude of the signal ensemble is gradually adjusted (improved) during the iterations, approaching the optimal value, which overall contributes to ensuring a high level of noise immunity [11].

Let's consider a situation where the objective function $f(x)$ evaluates the distance between the parameter vectors of the spectral density x and the target density $x_{target} = \begin{matrix} 0,7 \\ 0,7 \end{matrix}$ and the robustness density $x_{robust} = \begin{matrix} 0,2 \\ 0,2 \end{matrix}$. Then, the gradient of this function will be as follows:

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \partial f(x_1) \\ \partial f(x_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2(x^1_{target} - x^1) \\ -2(x^2_{robust} - x^2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Let's determine the condition for the experiment that the gradient descent method optimizes with a step $\eta = 0,1$ then the change in parameters (for example, signal amplitude and noise level) will take the form (Table 4).

At each step of the iteration, for example, the signal amplitude (parameter 1) will change according to the formula (as well as other parameters) [12]:

$$A_{new} = A_{old} - \eta \nabla f(A_{old}) \quad (4)$$

where η – the step coefficient, the learning rate, determines the change of the parameter at each step.

Table 4
Dynamics of changes in signal parameters during optimization

| Iteration | Parameter 1 (signal amplitude) | Parameter 2 (noise level) |
|-----------|--------------------------------|---------------------------|
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0,5 | 0,6 |
| 2 | 0,25 | 0,35 |
| 3 | 0,125 | 0,2 |
| 4 | 0,0625 | 0,1 |
| 5 | 0,03125 | 0,05 |

As calculations show, under this condition, parameter 1 is halved at each iteration, which indicates a stable optimization process aimed at reducing the amplitude to achieve signal stability. And parameter 2, decreases at different stages, is not so stable, which indicates a more complex optimization process, where the noise level decreases depending on other factors, such as frequency components or other parameters of the signal (Fig. 4).

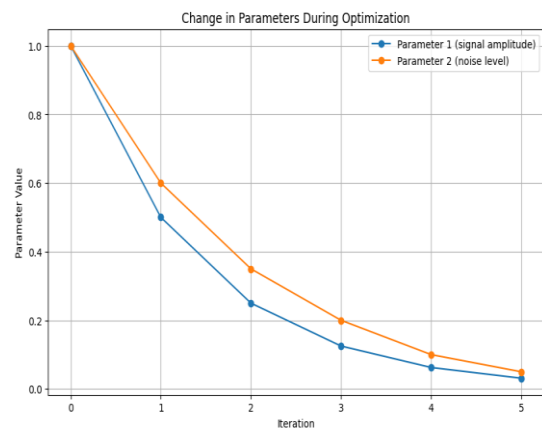


Fig. 4 – Iterative optimization of signal parameters (gradient method)

The original signal is a sine wave with a frequency between 0 and 1. The optimized signal can be obtained by applying gradient descent to the original signal. The algorithm of the gradient descent method is built in such a way that it «tries to find» such a signal amplitude that will minimize the difference between the original signal and noise (reduce the effect of noise on the signal). The amplitude of the signal changes significantly in the first few iterations (from 1 to 0.5). As the iterations continue, the signal amplitude stabilizes (0.0625), which indicates the effectiveness of the optimization method.

The effectiveness of the gradient descent method depends on the size of the gradient descent step η . If the step η is too small, the method may be inefficient, as it will require many iterations to achieve the desired result. If the step η is too large, the method may be unstable because it may «jump» through the minimum point of the objective function.

In this experimental case, at step $\eta = 0,1$, it took only 5 iterations to achieve the desired result, and the method improved the parameters by 10% at each iteration.

The gradient descent method is an effective way to optimize the spectral density of a signal, as it allows achieving the desired result in a small number of iterations. As a result of applying the method, the synthesized signals acquired appropriate ensemble properties and noise immunity characteristics, with the amplitude values of the signals increasing, which provided a higher level of noise immunity. The calculations show that choosing the optimal step size for gradient descent allows efficiently achieving the necessary experimental results.

Another effective method of optimization with constraints, using approximation by linear functions, is Newton's method. It can also be used for complex ensembles of synthesized signals. This method is effective for objective functions with a non-smooth graph, which

are often encountered in practice in signal synthesis [10, 11, 13]. Newton's method uses a quadratic approximation of the objective function $f(x)$ at the current evaluation point x_k [13]:

$$Q(x) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T(x - x_k) + \frac{1}{2}(x - x_k)^T H(x_k)(x - x_k) \quad (5)$$

where $f(x_k)$ – the value of the objective function at a point x_k ;

$\nabla f(x_k)$ – the gradient of the objective function at a point x_k ;

$H(x_k)$ – hessian – the matrix of the second partial derivatives of the function at the point x_k

Quadratic approximation allows quickly finding the directions of the steepest descent of the objective function, making the Newton method effective for fast convergence in regions where quadratic approximation is truly effective [11]. By using second-order derivatives in the calculations, the Newton method provides a more accurate approximation to the minimum of the objective function compared to methods that use first-order derivatives.

Optimization using the Newton method is presented in Fig. 5 and Table 5.

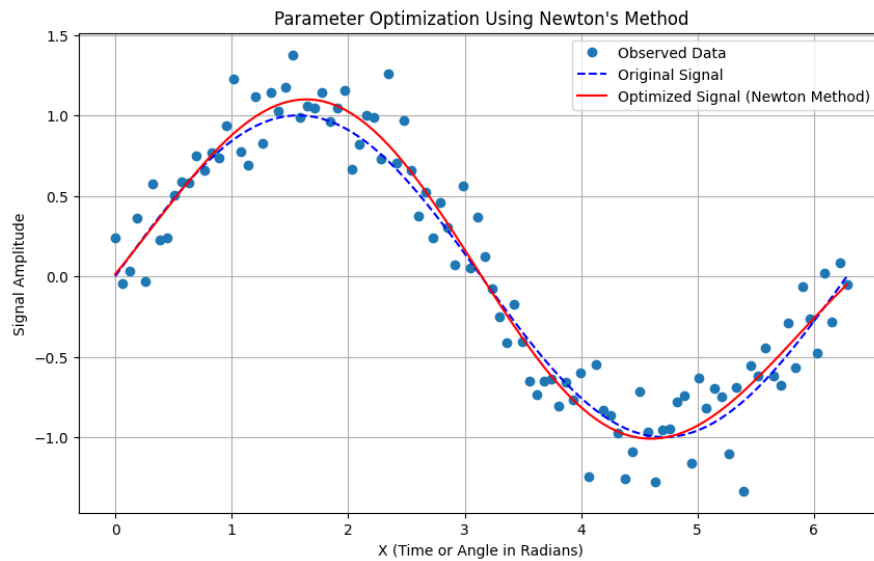


Fig. 5 – Optimization of signal parameters according to Newton's method

In Fig. 5 shows the optimization of the signal parameters by Newton's method, namely, reducing the error and improving the fit to the observed data. The observed data (black dots) are approximated by the original sinusoidal signal (blue dashed line) and the optimized signal (red solid line). Newton's method is an effective tool for optimizing the parameters of signal ensembles, in particular the frequency, in order to achieve the maximum fit to the data. The process begins with an initial assumption about the frequency, which in this example is set to 0.5. According to Newton's method, the derivative of the frequency is used to find a new value that is more optimal and better corresponds to the given data.

At each iteration step, Newton's method calculates a new frequency value, reducing the error. After the first iteration, the new frequency value is 0.45, with an error of 0.075. The process of iterations continues until the accuracy specified by the experiment is reached. In this example, optimization by Newton's method is achieved in 10 iterations, reducing the error from 0.1 to 0.0027. The results of the calculations are presented in the Table. 5.

Table 5.

Results of calculations by Newton's method

| Iteration | Frequency | The calculation error |
|-----------|-------------------|-----------------------|
| 0 | 0,5 | 0,1 |
| 1 | 0,45 | 0,075 |
| 2 | 0,475 | 0,05625 |
| 3 | 0,46875 | 0,0421875 |
| 4 | 0,46484375 | 0,03125 |
| 5 | 0,462953125 | 0,02265625 |
| 6 | 0,4619140625 | 0,015625 |
| 7 | 0,46123046875 | 0,0107421875 |
| 8 | 0,4608154296875 | 0,0068359375 |
| 9 | 0,4605712890625 | 0,004296875 |
| 10 | 0,460418701171875 | 0,00268546875 |

Thus, the use of the Newton method allows for a significant reduction in error from 10% to 0.027%, which corresponds to an overall error reduction of 99%. This demonstrates the high efficiency of the Newton method for optimizing the parameters of complex signal

ensembles. The high accuracy of this method is ensured by the use of second-order derivatives, which provide more precise approximations to the minimum of the objective function compared to methods that use first-order derivatives.

Additionally, the Newton method shows high performance in cases where the objective function is smooth. This makes the Newton method particularly useful for tasks requiring fast and accurate optimization of parameters, such as tuning the frequency, phase, and amplitude of signals in complex and dynamic radio environments.

Newton's method is an effective way to optimize the parameters of ensembles of complex signals in problems with high accuracy. However, this method may be less efficient for the objective function with a smooth graph, as it requires an increase in the number of iterations to achieve the optimal result. To solve such practical problems, it is necessary to consider the use of alternative optimization methods, such as the gradient method or the Nelder-Mead method.

However, Newton's method has a number of disadvantages. It is sensitive to the choice of the initial value of x_0 , which can affect the optimization results. If

the initial value is far from optimal, the method may converge slowly or not at all. Therefore, when using this method, it is important to choose an initial value (solution) that is close to the optimal one. This is not always appropriate. In addition, Newton's method can be slow for high-dimensional objective functions due to the need to calculate and invert the Hessian, which is computationally challenging. In cases where there is a need to take into account the above parameters, it is more reasonable to use methods based on gradients or Nelder-Mead.

It should also be noted that Newton's method may be less efficient in the case of functions with multiple local minima, where it may stop at a local minimum instead of a global one. This limits its application in problems with high complexity of the topography of the objective function.

A comparison of the effectiveness of the Nelder-Mead, gradient descent, and Newton methods for optimizing complex signal ensembles, highlighting the main advantages and disadvantages of each method, is presented in the table. 6.

Table 6.

Comparison of the effectiveness of the gradient method and the Nelder-Mead method

| Properties | Method of Nelder - Mead | Method based on gradients | Newton's method |
|------------|---|--|---|
| Strengths | <ol style="list-style-type: none"> Does not require the calculation of the gradient of the objective function Has high resistance to noise and measurement errors. Works well when there is limited information about the target function. | <ol style="list-style-type: none"> Effective for objective functions with a non-smooth graph Has the ability to build a fast algorithm for high-dimensional objective functions. Flexibility in adjusting the learning speed, which helps to avoid «falling into» local minima and ensures faster achievement of the general («global») minimum. | <ol style="list-style-type: none"> It has the ability to quickly achieve accurate parameters Effective for objective functions with a non-smooth graph When calculating, derivatives of the second order are used for accuracy |
| Weaknesses | <ol style="list-style-type: none"> May be ineffective for objective functions with a non-smooth graph. Can be slow for high-dimensional objective functions. May get «stuck» in local minima for complex functions. | <ol style="list-style-type: none"> Requires the calculation of the gradient of the objective function, which necessitates complex computation algorithms. Is sensitive to the choice of the initial point x_0, which can affect optimization results. Requires the adjustment of the step size η, which can impact the stability and speed of convergence. | <ol style="list-style-type: none"> The method requires calculation and inversion of the Hessian Is sensitive to the choice of initial values |

The Nelder-Mead method is more reasonable for use in cases where the objective function has a smooth graph and noise and disturbances become a significant problem (which is usually the case in practice). This method does not require the calculation of the gradient of the objective function, which is a significant advantage, because the calculation of the gradient is difficult or expensive. In addition, the Nelder-Mead method is based on direct search and use of the simplex, which provides good

resistance to interference and can work effectively under conditions of limited information about the objective function. This makes it optimal for solving problems where the objective function may have multiple local minima or be difficult to analyze due to various interferences and obstacles.

Gradient methods can be effective when the graph of the objective function is not smooth, and disturbances do not significantly affect the process. Gradient methods, such as gradient descent, can quickly converge to the

optimal solution, especially for high-dimensional objective functions. An important condition for the effectiveness of gradient methods is the condition for calculating the gradient. That is, it is always necessary to consider the situation to what extent it is costly or not costly. The use of gradient methods is the optimal solution for problems with a large number of parameters, since they can be adapted to quickly converge to the minimum of the objective function.

5 RESULTS

As shown in fig. 1-3 and in table. 2-3, the gradient method proves its effectiveness in adjusting the signal amplitude and noise level, namely according to the characteristics:

1. Increasing signal similarity. Fig. 2 shows that the initial amplitude of the signal varies significantly during the first few iterations and then stabilizes at a value of 0.0625. This indicates the effectiveness of the gradient descent method in reducing the influence of interference on the signal.

2. Reduction of signal amplitude. In the table 4 shows that the signal amplitude is halved at each iteration, demonstrating a stable optimization process aimed at achieving signal stability.

3. Reduction of noise level. Parameter 2 (noise level) decreases at different stages of the optimization, indicating a more complex optimization process where the noise level is reduced depending on other factors, such as frequency components or other signal parameters (Fig. 3).

As shown in fig. 4-5 and in table. 6, Newton's method also proves its high efficiency in the tasks of optimizing signal parameters. Namely, in fig. 5, it can be seen that Newton's method significantly reduces the error and improves the fit to the observed data. The error decreases from 0.1 to 0.0027 in 10 iterations, which corresponds to a 99% error reduction.

In the table 6 shows how the frequency of the signal changes at each iteration step, reducing the error. After the first iteration, the new frequency value is 0.45, and the iteration process continues until the specified accuracy is reached.

Due to the use of second-order derivatives, Newton's method provides a more accurate approximation to the minimum of the objective function compared to methods that use first-order derivatives.

The further development of this scientific research is the integration of optimization methods with innovative technologies of machine learning and artificial intelligence. The use of machine learning algorithms for preliminary data analysis and selection of optimal initial («starting») parameters for optimization algorithms, such as gradient descent and Newton's method, can significantly reduce the time to reach optimal results and increase their accuracy.

Another promising direction of research is the development of hybrid optimization methods, which combine the advantages of gradient methods and

evolutionary search methods (Nelder-Mead method). This approach will make it possible to develop algorithms capable of effectively solving problems with a large number of parameters and different types of objective functions. The use of hybrid methods can significantly increase the efficiency of telecommunication systems, radar systems and other industries where high accuracy and reliability of operation are critical.

УДК 621.391

Комар О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Лисечко В.П. – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Науковий центр Повітряних Сил Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Таршин В.А. – доктор технічних наук, професор, заступник начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба з навчальної роботи, Харків, Україна

Місюра О.М. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Безверхий С.А. – старший науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНИХ АПРОКСИМАЦІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ ЗА ГРАДІЄНТНИМ МЕТОДОМ І МЕТОДОМ НЬЮТОНА

В статті досліджено ефективність методів градієнтного спуску та Ньютона для оптимізації параметрів ансамблів складних сигналів. Розроблено та впроваджено алгоритми, що підвищують точність налаштування параметрів та забезпечують обґрунтовану оптимізацію спектральних, часових і статистичних характеристик сигналів. Ефективність застосування методів підтверджено експериментальним шляхом на прикладі зменшення похибки та підвищення рівня завадостійкості. Отримані результати обґрунтовують удосконалення параметрів складних сигналів, що доводить ефективність використання для безпроводових телекомунікаційних систем з метою забезпечення стабільної та надійної роботи в умовах динамічних змін середовища та високого рівня завад.

У статті проведено порівняння математичних методів оптимізації, а саме градієнтного методу і методу Ньютона, запропоновано математичні моделі і

побудовано алгоритми, які емпірично доводять ефективність застосування досліджених математичних методів в визначеній науковій області – для оптимізації параметрів ансамблів складних сигналів. У наукових роботах [1-6, 9, 12] представлено алгоритми, за градієнтним методом та методом Ньютона, але в них не розглянуто детально порівняльний аналіз ефективності цих методів для оптимізації параметрів ансамблів складних сигналів для реалізації в різних наукових і практичних задачах. Ефективність запропонованих в статті алгоритмів підтверджено експериментальним шляхом, що дозволило досягнути зменшення похибки та покращення характеристик ансамблів складних сигналів.

В результаті експериментів з використанням методів градієнтного спуску та Ньютона було досягнуто значного зменшення похибки та покращення стабільності сигналів. Метод Ньютона знизив похибку з 0,1 до 0,0027, обґрунтовуючи високу точність налаштування параметрів сигналу. Метод градієнтного спуску забезпечив стабільне зниження норми градієнта з 12,75 до менш ніж 1,23, ефективно зменшуючи рівень завад, тобто підвищуючи завадостійкість.

Ключові слова: лінійні апроксимації, ансамблі складних сигналів, градієнтний метод, метод Ньютона, норма градієнту, функція цілі, оптимізація параметрів сигналів, ітераційний алгоритм, завадостійкість.

REFERENCES

1. Linear approximations and the gradient method in the optimization of signal parameters / [Ivanov V.V., Shovkun V.M.] // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". "Radio engineering, radio electronics" series. – 2017. No. 3. P. 45-50.
 2. Newton's method for optimization of complex signals: theoretical aspects and practical application / [Petrenko I.M., Kovalenko O.A.] // Journal "Current problems of radio engineering". – 2018. Vol. 5. No. 2. P. 23-30.
 3. Optimization methods of signal ensembles using gradient descent and Newton algorithms / [Ivanov O.M., Petrenko V.I.] // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". "Radio engineering, radio electronics" series. – 2021. No. 4. P. 67-74.
 4. Analysis of the effectiveness of the gradient method for optimizing the spectral characteristics of signals / [Sydorenko V.V., Kuzmin I.M.] // Scientific works of NTUU "KPI". – 2019. No. 6. P. 89-95.
 5. Research on the application of gradient descent and Newton methods to optimize parameters of signal ensembles in pattern recognition tasks / [Sydorenko V.V., Kuzmin I.M., Kravchenko L.P.] // Scientific works of NTUU "KPI". – 2022. No. 8. P. 112-118.
 6. Comparative analysis of gradient descent and Newton methods for optimizing characteristics of signal ensembles in source localization problems / [Petrenko V.I., Kovalenko O.A., Seleznyov M.V.] // Journal "Modern problems of radio engineering". – 2023. Vol. 10. No. 3. P. 42-49.
 7. Optimization of filter parameters using Nelder-Mead and Levenberg-Marquardt algorithms / [Pugach O. V., Ivanov A. M.] // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". "Radio electronics, telecommunications, computer science" series. – 2020. No. 3. P. 22-27.
 8. Optimization of Synthesized Signals Using Differential Evolution Algorithm / [O. V. Oleinik, O. M. Sydorenko] // International Journal of Microelectronics and Nanotechnology. – 2019. Vol. 14. № 3. P. 195-202.
 9. Blind signal separation based on widely linear complex autoregressive process of order one / [Jiong Li, Yuan Qin, Menglan Fan, Xiaogang Tang, Lijuan Gao, Long Chen, Junhao Feng] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. Vol. 2018. P. 1-12. DOI: 10.1186/s13638-018-1286-x
- Polynomiography via the Hybrids of Gradient Descent and Newton Methods / [Bahman Kalantari] // International Journal of Mathematical Modeling and Computations. – 2017. Vol. 10. № 4. P. 243-258. DOI: 10.1007/s11721-017-0131-4.
1. Gradient regularization of Newton method with Bregman distances / [S. O. Ivasyshen, M. V. Klymchuk] // Mathematical Programming. – 2019. Vol. 173. P. 509-536. DOI: 10.1007/s10107-018-1263-3 (SpringerLink)
 2. Optimal sum-throughput analysis for downlink cooperative SWIPT NOMA systems / [T. N. Do, B. An] // Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom). – 2018. P. 85-90. DOI: 10.1109/SIGTELCOM.2018.8325811 (GitHub).
 3. Gradient Descent vs. Newton's Gradient Descent / [A. Blum, J. Hopcroft, R. Kannan] // Journal of Machine Learning Research. – 2016. Vol. 17. P. 1-30. DOI: 10.1145/1235

ЛІТЕРАТУРА

1. Лінійні апроксимації та градієнтний метод в оптимізації параметрів сигналів / [Іванов В.В., Шовкун В.М.]//Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка». – 2017. № 3. С. 45-50.
 2. Метод Ньютона для оптимізації складних сигналів: теоретичні аспекти та практичне застосування / [Петренко І.М., Коваленко О.А.] // Журнал «Сучасні проблеми радіотехніки». – 2018. Т. 5. № 2. С. 23-30.
 3. Методи оптимізації ансамблів сигналів з використанням алгоритмів градієнтного спуску та Ньютона / [Іванов О.М., Петренко В.І.] // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка». – 2021. № 4. С. 67-74.
 4. Аналіз ефективності градієнтного методу для оптимізації спектральних характеристик сигналів / [Сидоренко В.В., Кузьмін І.М.]// Наукові праці НТУУ «КПІ». – 2019. № 6. С. 89-95.
 5. Дослідження застосування методів градієнтного спуску та Ньютона для оптимізації параметрів ансамблів сигналів у задачах розпізнавання образів / [Сидоренко В.В., Кузьмін І.М., Кравченко Л.П.] // Наукові праці НТУУ «КПІ». – 2022. № 8. С. 112-118.
 6. Порівняльний аналіз методів градієнтного спуску та Ньютона для оптимізації характеристик ансамблів сигналів в задачах локалізації джерел / [Петренко В.І., Коваленко О.А., Селезньов М.В.] // Журнал «Сучасні проблеми радіотехніки». – 2023. Т. 10. № 3. С. 42-49.
 7. Оптимізація параметрів фільтрів з використанням алгоритмів Нелдера-Міда та Левенберга-Марквардта / [Пугач О. В., Іванов А. М.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Радіоелектроніка, електров'язок, інформатика». – 2020. № 3. С. 22-27.
 8. Optimization of Synthesized Signals Using Differential Evolution Algorithm / [O. V. Oleinik, O. M. Sydorenko] // International Journal of Microelectronics and Nanotechnology. – 2019. Vol. 14. № 3. P. 195-202.
 9. Blind signal separation based on widely linear complex autoregressive process of order one / [Jiong Li, Yuan Qin, Menglan Fan, Xiaogang Tang, Lijuan Gao, Long Chen, Junhao Feng] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. Vol. 2018. P. 1-12. DOI: 10.1186/s13638-018-1286-x
 10. Polynomiography via the Hybrids of Gradient Descent and Newton Methods / [Bahman Kalantari] // International Journal of Mathematical Modeling and Computations. – 2017. Vol. 10. № 4. P. 243-258. DOI: 10.1007/s11721-017-0131-4.
 11. Gradient regularization of Newton method with Bregman distances / [S. O. Ivasyshen, M. V. Klymchuk] // Mathematical Programming. – 2019. Vol. 173. P. 509-536. DOI: 10.1007/s10107-018-1263-3 (SpringerLink)
 12. Optimal sum-throughput analysis for downlink cooperative SWIPT NOMA systems / [T. N. Do, B. An] // Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom). – 2018. P. 85-90. DOI: 10.1109/SIGTELCOM.2018.8325811 (GitHub).
 13. Gradient Descent vs. Newton's Gradient Descent / [A. Blum, J. Hopcroft, R. Kannan] // Journal of Machine Learning Research. – 2016. Vol. 17. P. 1-30. DOI: 10.1145/1235
- Комар Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного авіаційного університету, Київ, Україна. <https://orcid.org/0009-0002-2994-6556>
- Лисечко Володимир Петрович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, <http://orcid.org/0000-0002-1520-9515>.
- Таршин Володимир Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, заступник начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба з навчальної роботи, Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7059-6354>.
- Місюра Олег Миколайович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-3025-3477>
- Безверхий Сергій Анатолійович**, старший науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-2767-3753>

Редакційна колегія

Бабасв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Буцько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Гаврилюк В. І., д.ф-м.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Доценко С. І., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ;

Жуковицький І. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Каргін А. О., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Климаш М. М., д.т.н., професор,
НУ «Львівська політехніка»;

Zbigniew Łukasik Kazimierz Pulaski
University of Humanities and Technology in
Radom, Professor;

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Mareks Mezitis, Dr.sc.ing., Head of Scientific
Institution Transporta Akadēmija, Rīga,
Latvija;

Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Панченко С. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Приходько С. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ,
головний редактор;

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

Серков О. А., д.т.н., професор, НТУ «ХП»;

Скалозуб В. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і
технологій;

Трубчанінова К. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Thierry Horsin, Enseignant chercheur au
CNAM (PU);

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

© Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti

*Свідоцтво про державну реєстрацію
Серія КВ № 21514-11414 ПП від 18. 08. 2015 р.
Засновник - Український державний університет
залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, м. Харків,
61050*

*ISSN 2413-3833 (Online), ISSN 1681-4886 (Print)
Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de
l'ISSN, 75002 PARIS, France.*

*Журнал входить до Переліку наукових фахових видань
України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і
науки України № 409 від 17 березня 2020 р. зі змінами
від 02.07.2020 р. № 886)*

*Журнал включено до міжнародної наукометричної бази
даних Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/++++.p24787015.3.html>),
Google Scholar (<https://scholar.google.com>), науково-видавничої платформи
«Наукова періодика України» (<http://jiks.kart.edu.ua>).*

Затверджений до друку Вченою радою УкрДУЗТ

*Рецензування проводиться конфіденційно за принципами
double-blind*

Статті друкуються мовою оригіналу

*Редакція не обов'язково поділяє думку автора і
не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився*

*Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції
журналу*

*Індекс журналу у Каталозі передплатних видань
України – 48707*

*Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50,
майдан Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 215.
Тел.: (057) 730-10-84, 730-10-82. E-mail: xiittc@ukr.net
ndch.ukrsurt@ukr.net*

*Відповідальна за випуск Харін Р.О.
Редактор Ібрагімова Н. В.*

*Підписано до друку 25.10.2024 р. Формат 60x84 1/8.
Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №
Наклад 50 прим. Ціна договірна.
Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.*

*Видавець та виготовлювач
Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.*

