



ISSN 1681-4886 (Print)
ISSN 2413-3833 (Online)

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

№3 2026 р.

3(166)' 2026

**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

**INFORMACIJNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI**

Зміст – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту

КУСТОВ В. Ф.

Особливості електромагнітного середовища та каналів проникнення завад в електронні засоби залізничної автоматики України в умовах нових технічних регламентів безпеки

.....4

ШЕВЧЕНКО В. І., ЛАВРУХІН О. В.

VirtLab: концепція модульної цифрової освітньої екосистеми для професійної та STEM-підготовки фахівців транспортної галузі

.....18

TROIANIVSKYI V. I.

System model of intelligent power supply management of transport infrastructure

.....30

SOTNYK V. O.

Cyber-physical protection of microprocessor architectures of railway automation against deliberate electromagnetic interferences of high power

.....40

ГЕВОРКЯН Е.С., КОМАРОВА Г.Л., ВОЛОШИНА Л.В., ВОЛОШИН Д.І.,
ТИМОФЕЄВА Л.А.

**Метрологічне забезпечення контролю геометричних параметрів пористих
матеріалів на основі аналізу фільтраційних характеристик**

.....51

ЛАБЕНКО Д. П.

**Використання алгоритму Дейкстри для оптимізації задач управління та
планування перевезень у навчальному процесі**

.....66

SHCHERBAK Ya. V., IVAKINA K. Ya., NERUBATSKYI V. P.

**Automatic armature current control system of a motor with a pulsed converter
model**

.....72

ЄЛІЗАРЕНКО А. О.

Модернізація мереж поїзного радіозв'язку гектометрового діапазону

.....82

ЗМІЙ С. О., КАЛАШНИК М. О., MELIKHOV Anatolii, Mipro OY, Tallinn,
Estonia

**Архітектура цифрової платформи мультимодальних пасажирських
перевезень із подієвою інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі**

.....88

СЕМЕНЕНКО Ю. О., СЕМЕНЕНКО О. Д., РЯБЕНКОВ І. О., СОРОКА А. С.,
ШИРОКИЙ Ю. В.

**Дослідження кінематичних характеристик гібридних робототехнічних
систем паралельно-послідовної структури з додатковим кінематичним
зв'язком**

.....101

PANCHENKO S.V. , ZHUCHENKO O. S., LYSECHKO V. P., INDYK S.V.

**Estimation of the Energy of Interfering Signals in a Code Division Multiple
Access System Based on Unequal-Energy Complex Signals for Users Susceptible
to Dominance by Other Users' Signals**

.....117

KUSHCH M.Y., ABBASOV O.O., KANEVSKYI M.V., SHCHEBLYKINA O.V.

**A comparative analysis of edge and cloud computing architectures for rolling
stock monitoring systems**

.....129

КУСТОВ В. Ф., к.т.н., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна)

Особливості електромагнітного середовища та каналів проникнення завад в електронні засоби залізничної автоматики України в умовах нових технічних регламентів безпеки

Анотація

Розглянуто особливості електромагнітного середовища і каналів проникнення електромагнітних завад в електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) в умовах експлуатації на залізницях України.

Показано, що специфіка електромагнітного середовища залізниць України визначена не тільки параметрами джерел завад, але й особливостями інфраструктури, через яку зовнішній електромагнітний вплив може трансформуватися в кондуктивну, синфазну або диференціальну заваду безпосередньо на портах ЕЗ ЗА. До таких факторів віднесено протяжні лінії електроживлення 6 і 10 кВ, систему «два проводи — рейка» (ДПР) 27,5 кВ і її електричний зв'язок із тяговою мережею змінного струму, силові трансформатори ОМ (однофазні масляні), дросель-трансформатори (ДТ), рейкову мережу, системи заземлення, сезонну зміну параметрів баласту і ґрунту, грозові та комутаційні впливи.

Розглянуто можливість проникнення одного зовнішнього електромагнітного впливу одночасно через декілька портів, зокрема через трансформатор ОМ до порту живлення та через систему заземлення і середню точку дросель-трансформатора до сигнальних кіл. Показано, що розрахункова інтенсивність небезпечних функціональних відмов FFR резервованих структур залежить від коефіцієнта деградації елементної бази приблизно квадратично, тоді як дефіцит ізоляційної координації входить у бета-фактор спільних відмов лінійно, що здатне домінувати в підсумковому показнику для високонадійних компонентів.

Показано зв'язок таких впливів із функціональною безпечністю ЕЗ ЗА рівнів SIL 3 і SIL 4. Електромагнітний вплив може призводити не тільки до збою або переходу системи в захисний стан, але і формування небезпечного помилкового вихідного стану, відмов за спільною причиною та збільшення інтенсивності небезпечних відмов у процесі експлуатації.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, залізнична автоматика, електронні засоби залізничної автоматики, функціональна безпечність, SIL 3, SIL 4, ДСТУ EN 50121-4, дросель-трансформатор, силовий трансформатор ОМ, галузеві норми ЕМС.

Постановка проблеми

Електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) належать до найбільш відповідальних технічних засобів залізничної інфраструктури, оскільки результати їхнього функціонування безпосередньо використовують для контролю стану колійних ділянок, стрілок та інших об'єктів, формування команд керування і гарантування безпеки руху поїздів. До цієї категорії належать як окремі електронні пристрої — колійні приймачі, пристрої узгодження, контролери стрілок, модулі систем

підрахунку осей, джерела живлення, так і побудовані на їхній основі мікропроцесорні системи централізації, блокування та контролю.

Із 3 травня 2026 р. в Україні набрали чинності Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту [1] і Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту [2]. Разом із Законом України «Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України» від 09.06.2026 р. № 4904-IX [3] вони посилюють ризик-орієнтований підхід щодо безпеки

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

залізничної системи. На відміну від національних стандартів (ДСТУ), застосування яких за загальним правилом є добровільним, вимоги технічних регламентів є обов'язковими. Це підвищує значення доказу безпечності для конкретних умов застосування і аналізу характерних національних електромагнітних впливів, якому присвячена ця стаття.

Базовим нормативним документом щодо EMC стаціонарної сигнальної та телекомунікаційної апаратури є ДСТУ EN 50121-4 [4], гармонізований із відповідним європейським стандартом.

У 2025 р. CENELEC підготовлено проєкт нової редакції prEN 50121-4:2025 [5], який має замінити EN 50121-4:2016 і A1:2019; у 2026 р. документ перейшов до стадії FprEN 50121-4:2026 [6]. Офіційна назва документа з переходом до фінальної стадії проєкту не змінилася. Проєкт уточнює сферу застосування, структуру вимог щодо емісії та несприйнятливості й охоплює сигнальну і телекомунікаційну апаратуру, включно з належними до неї системами живлення. Водночас збережено продуктивний, порт-орієнтований підхід, тому оновлення стандарту не усуває необхідності дослідження специфічних для залізниць України інфраструктурних каналів і фактичного електромагнітного середовища.

Перелічені стандарти установлюють відтворювані вимоги щодо емісії та несприйнятливості обладнання і використовують базові методи випробувань серії IEC 61000-4 [7]. Такий підхід є необхідною основою оцінювання відповідності електронного обладнання. Водночас стандартизована випробувальна матриця не може апіорі враховувати всі особливості електромагнітного середовища, топології електроживлення, заземлення, тягової та рейкової інфраструктури конкретної національної залізничної мережі.

Особливість залізниць України полягає не тільки в наявності певних специфічних джерел завад. Не менш важливими є канали, через які ці завади можуть проникати до портів ЕЗ ЗА. Протяжні високовольтні лінії електроживлення 6 і 10 кВ, система «два проводи — рейка» (ДПР) 27,5 кВ на ділянках електротяги змінного струму, контактна і рейкова мережі, силові трансформатори ОМ (однофазні масляні), дросель-трансформатори (ДТ), сигнальні кабелі та системи заземлення утворюють складну розподілену електричну структуру. Її високочастотні властивості істотно відрізняються від властивостей, які притаманні залізницям європейських країн, а також залежать від характеристик видів електротяги поїздів, електроживлення або рейкових кіл.

Викладені в статті результати обґрунтовують практичну потребу в додаткових галузевих

нормативних документах АТ «Укрзалізниця», що конкретизували б вимоги ДСТУ EN 50121-4 з урахуванням національних умов.

Детальне інженерне опрацювання окремих числових рівнів виходить за межі цієї публікації; основну увагу зосереджено на інфраструктурних каналах проникнення завад і їхньому зв'язку з функційною безпечністю.

Наслідки електромагнітного впливу на ЕЗ ЗА можуть бути принципово різними: короточасний збій або зависання; перехід у передбачений захисний стан із затримкою руху; формування небезпечного помилкового стану; а також поступова деградація елементів із підвищенням інтенсивності небезпечних відмов.

Разом із тим електромагнітна завада може одночасно впливати на декілька портів або резервованих каналів: наприклад, одна зовнішня завада потенційно може проникати через ОМ до порту живлення і одночасно через систему заземлення, середню точку ДТ і сигнальні кола до інших портів тієї самої системи. У такому випадку припущення про незалежність каналів потребує окремого підтвердження, а електромагнітний фактор потрібно розглядати як потенційну причину відмови за спільною причиною (common cause failure, CCF).

У зв'язку з цим актуальним є розроблення додаткових галузевих нормативних документів до ДСТУ EN 50121-4, призначення яких полягає не в критиці чи механічному підвищенні базових європейських рівнів, а у встановленні процедури врахування характерних умов залізниць України: вибір передбачених міжнародними стандартами ступенів жорсткості; доповнення відсутніх експлуатаційних сценаріїв; верифікація інфраструктурних каналів проникнення; встановлення критеріїв безпечної реакції та зв'язку результатів EMC-випробувань із доказами функціональної безпечності SIL 3/SIL 4.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перехід нормативної бази України до стандартів серії EN 50121 відбувся через ідентичне ухвалення європейських документів (чинний ДСТУ EN 50121-4:2019 — IDT до EN 50121-4:2016), тому спеціальні вимоги на основі особливостей електромагнітного середовища залізниць України окремо не встановлені.

У сучасних дослідженнях значну увагу приділено електромагнітній взаємодії тягового електропостачання, рухомого складу та систем залізничної автоматики. Для автоматичної локомотивної сигналізації досліджено вплив гармонік тягового струму на сигнальний канал [8]. Для

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

рейкових кіл запропоновано автоматизований моніторинг спотворень і завад у сигналах [9], а також критерії вибору параметрів системи моніторингу ЕМІ тягової мережі відповідно до нормативних вимог [10]. Незалежні натурні дослідження рухомого складу підтверджують, що оцінювання його ЕМС із системами виявлення поїзда на основі рейкових кіл потребує вимірювань у реальних умовах, де одночасно діють додаткові джерела завад [11]. Сучасне моделювання електромагнітного зв'язку паралельних рейкових кіл також показує істотну залежність рівня завади від геометрії, довжини паралельного проходження, частоти і параметрів рейкової лінії [12]. В Україні цей напрям розвинуто до прикладного завдання підвищення завадостійкості рейкових кіл із застосуванням фільтрів з нанокристалічним осердям [13].

У попередніх роботах автора досліджено специфічний для залізниць України канал проникнення завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц через високовольтні лінії електроживлення та силові трансформатори ОМ до порту живлення ЕЗ ЗА [14], вплив вологості на параметри захисних елементів і каналів проникнення завад [15], а також питання зміни показників надійності в процесі експлуатації [16, 17].

Закордонні дослідження підтверджують окремі складові проблеми для інших мереж: дугові процеси в контактні пантографа є джерелом перехідних процесів, що впливають на GSM-R (Boschetti та ін. [18]); питомий опір мерзлого ґрунту експоненціально залежить від температури (Shan та ін. [19]); протяжна рейкова мережа чутлива до геомагнітно-індукованих струмів (Boteler [20]). Ці роботи не стосуються національної специфіки України, але підтверджують тезу статті: інфраструктурний канал проникнення завади є не менш важливим предметом дослідження, ніж сам факт існування джерела завади.

Результати розглянутих досліджень показують, що для засобів залізничної автоматики оцінювання ЕМС не може бути обмежено лише встановленням рівня зовнішньої завади або фактом збереження працездатності пристрою. Для систем, що виконують функції безпеки, необхідно також оцінювати можливий функціональний наслідок електромагнітного впливу відповідно до принципів функціональної безпечності залізничних систем, установлених ДСТУ EN 50129 [21]. Це визначає необхідність подальшого розгляду зв'язку між ЕМС, небезпечними відмовами та відмовами за спільною причиною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проведений аналіз показує, що сучасні дослідження сформували значний теоретичний та

експериментальний доробок щодо електромагнітної взаємодії тягового електропостачання, рухомого складу і рейкових кіл, моніторингу завад і засобів підвищення завадостійкості [8–13]. Водночас потрібні подальший розвиток і системний аналіз інших інфраструктурних каналів проникнення завад безпосередньо до електронних засобів залізничної автоматики — через кола електроживлення, силові трансформатори ОМ, рейково-заземлювальну мережу та дросель-трансформатори, включно з можливістю одночасного впливу однієї електромагнітної причини на декілька портів або резервованих каналів.

Мета і задача роботи

Метою дослідження є обґрунтування складу і структури додаткових галузевих вимог щодо ДСТУ EN 50121-4 на основі систематизації характерних для залізниць України джерел електромагнітних завад та інфраструктурних каналів їх проникнення до портів електронних засобів залізничної автоматики, а також встановлення зв'язку відповідних впливів із критеріями функціональної безпечності SIL 3/SIL 4.

Завдання дослідження: проаналізувати базові вимоги ДСТУ EN 50121-4 і попередній досвід національного нормування ЕМС залізничної автоматики; систематизувати особливості електромагнітного середовища та інфраструктури залізниць України — електроживлення 6/10 кВ, систему ДІР 27,5 кВ, контактну мережу, рейкову мережу, заземлення; дослідити силові трансформатори ОМ і дросель-трансформатори як інфраструктурні канали проникнення завад до портів ЕЗ ЗА; оцінити вплив сезонної зміни параметрів баласту і ґрунту на співвідношення паралельних шляхів поширення завад; сформулювати пропозиції щодо структури додаткових галузевих вимог щодо ДСТУ EN 50121-4 включно з процедурою зіставлення фактичного середовища з вимогами стандарту і визначити напрями подальших експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу дослідження

5.1. Аналіз базових вимог ДСТУ EN 50121-4 і зв'язок ЕМС із функціональною безпечністю

Основою нормативного забезпечення ЕМС апаратури ЗА є ДСТУ EN 50121-4, гармонізований з EN 50121-4 і заснований на базових методах визначення ЕМС серії ІЕС 61000-4, що забезпечує відтворюваність випробування незалежно від виробника. Водночас продуктивний характер стандарту зумовлює необхідний ступінь узагальнення: він не може враховувати всі особливості національної інфраструктури, електроживлення, заземлення і кліматичних умов, тому необхідність додаткових галузевих вимог полягає не в «недосконалої» EN 50121-4, а репрезентативності його випробувального

ІНФОРМАЦІЙНО – КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

сценарію для конкретного середовища залізниць України.

Аналіз змін prEN 50121-4:2025 [5] і його подальшої стадії FprEN 50121-4:2026 [6] показує, що розвиток європейської нормативної бази EMC СЦБ відбувається переважно через уточнення сфери застосування, актуалізації нормативних посилань, структури вимог і таблиць емісії та несприйнятливості зі збереженням продуктового, порт-орієнтованого принципу випробувань. Це створює сучаснішу методичну основу для оцінювання EMC апаратури, однак не усуває необхідності встановлення фактичних параметрів електромагнітного середовища конкретної залізничної мережі та інфраструктурних каналів формування завад на нормованих портах обладнання. Для залізниць України це стосується, зокрема, ВЛ СЦБ 6/10 кВ, системи ДПР 27,5 кВ, силових трансформаторів ОМ, дросель-трансформаторів, рейково-заземлювальної мережі та сезонної зміни параметрів відповідних каналів. Особливого значення набуває можливість одночасного проникнення однієї зовнішньої електромагнітної завади через декілька інфраструктурних трактів і портів резервованої системи. Отже, додаткові галузеві вимоги для залізниць України мають не замінювати або механічно посилювати EN 50121-4, а встановлювати репрезентативні умови застосування передбачених ним методів і ступенів жорсткості на основі характеристик національної інфраструктури. Оскільки питання безпеки не входять до сфери prEN/FprEN 50121-4 [5, 6], для ЕЗ ЗА, що реалізують функції SIL 3/SIL 4, результати EMC-випробувань мають бути додатково оцінені за можливими функціональними наслідками відповідно до принципів ДСТУ EN 50129 [21].

Показовим є попередній досвід нормування EMC в Україні: скасований нещодавно ДСТУ 4151:2003 для комплексів керування рухом поїздів, разом із традиційними випробуваннями, окремо враховував рівні жорсткості ЕЗ ЗА, динамічні зміни напруги живлення та вплив цифрових радіотелефонів залежно від умов експлуатації, а раніше чинний ДСТУ 4178:2003 встановлював вимоги щодо функціональної безпечності за дій електромагнітних завад. Це не привід повертати скасовані норми, а підстава перевірити, чи не були в процесі гармонізації з EN/IEC втрачені сценарії, фізично характерні для ЕЗ ЗА України.

Функціональний наслідок однакового рівня електромагнітного впливу може істотно відрізнятись для різних функцій. Короткочасне порушення роботи некритичного телекомунікаційного пристрою може бути допустимим, тоді як для колійного приймача, контролера стрілки або іншого засобу, що бере участь у формуванні безпечного стану, правдоподібний, але помилковий вихідний сигнал є принципово іншою,

небезпечною ситуацією. Тому для ЕЗ ЗА необхідно оцінювати не тільки збереження працездатності під час EMC-випробування, а і відсутність хибної команди, помилкового контрольного стану, прихованої втрати діагностики та одночасного порушення резервованих каналів.

Вплив електромагнітного середовища на функціональну безпечність може бути реалізований щонайменше трьома механізмами. Перший – безпосередній функціональний вплив: електромагнітна завада може спричинити збій, зависання або перезапуск електронного пристрою, хибне спрацювання входу чи виходу; наслідком може бути перехід системи в передбачений захисний стан із затримкою руху поїздів або, за несприятливого розвитку, формування помилкового контрольного чи керуючого стану, здатного створити небезпечну ситуацію.

Другий механізм – відмова за спільною причиною (common cause failure, CCF): одна зовнішня електромагнітна подія може одночасно впливати на декілька каналів резервованої системи або проникати до одного комплексу різними інфраструктурними шляхами. Приклад такого багатопортового впливу через ОМ і середню точку дросель-трансформатора (СТ ДТ) як складної розподіленої електричної структури наведено у розділі 1. Для такого випадку припущення про незалежність резервованих каналів потребує окремого підтвердження.

Третій механізм – поступове погіршення надійності електронних засобів за дії експлуатаційних факторів: вологість, конденсат і повторювані електромагнітні впливи можуть змінювати параметри елементів захисту і каналів проникнення завад, збільшуючи фактичну інтенсивність відмов [15]. Для резервованих структур ЕЗ ЗА це впливає на інтенсивність небезпечних функційних відмов непропорційно сильно, що детально розглянуто кількісно в наступному підрозділі; питання зміни інтенсивності відмов у процесі експлуатації розглянуто в роботі [17].

Отже, принциповим є встановлення не лише адекватних параметрів електромагнітного впливу, але і критеріїв безпечної реакції ЕЗ ЗА: під час і після дії завади не мають виникати хибна команда керування, помилковий контрольний стан чи прихована втрата діагностики, а для резервованих систем окремо має бути оцінена можливість спільного впливу на декілька каналів.

5.2. Особливості електромагнітного середовища та інфраструктури залізниць України

Електромагнітне середовище ЕЗ ЗА визначено не тільки параметрами зовнішніх джерел завад, але і структурою тягового та нетягового

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

електропостачання, рейкової мережі, протяжних повітряних і кабельних ліній і систем заземлення. Для залізниць України ця обставина має особливе значення через поєднання на діючій мережі різних систем тяги (25 кВ, 50 Гц і 3 кВ постійного струму) та успадкованих схем електропостачання пристроїв автоматики. На рис. 1 показані джерела та інфраструктурні канали формування електромагнітних завад у портах ЕЗ ЗА. Суцільними лініями позначено встановлені функціональні/електричні зв'язки, штриховими – потенційні високочастотні канали, що потребують експериментального підтвердження.

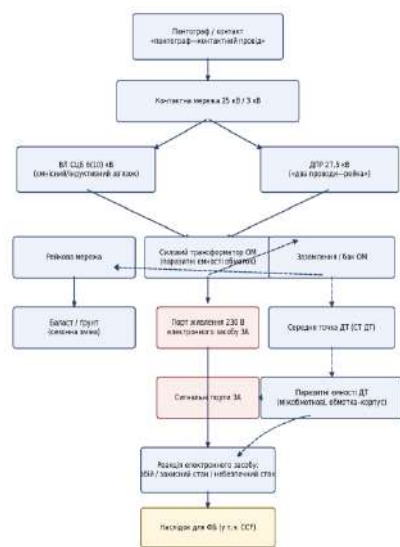


Рис. 1. Джерела та інфраструктурні канали формування електромагнітних завад на портах ЕЗ ЗА

На електрифікованих змінним струмом ділянках разом із контактною мережею застосовувана і система поздовжнього електропостачання ДПР 27,5 кВ («два проводи — рейка») на електрифікованих ділянках змінного струму, причому одним з елементів електричного кола є рейка [22]. Саме використання рейкової мережі як складової системи електропостачання принципово важливе з позиції ЕМС: на відміну від незалежної промислової розподільної мережі, система ДПР конструктивно поєднує кола електропостачання нетягових споживачів із рейковою мережею, яка одночасно бере участь у поверненні тягового струму та функціонуванні низки засобів залізничної автоматики.

Натурні вимірювання і статистичне оцінювання якості електроенергії у споживачів ДПР 27,5 кВ підтверджують практичну значущість цього питання для ЕМС [23]. Ще суттєвішим є електричний зв'язок системи ДПР із тяговою інфраструктурою: лінії ДПР, як і контактна мережа, отримують живлення від тієї самої розподільної установки, а рейка як третій

провідник створює гальванічний шлях впливу тягового струму, тому систему ДПР доцільно розглядати як інфраструктурний тракт, а не просто джерело електроенергії.

Іншою характерною особливістю успадкованої інфраструктури є застосування протяжних повітряних ліній електропостачання пристроїв автоматики напругою 6 і 10 кВ (ВЛ СЦБ). Електромагнітний вплив тягової мережі на такі лінії є фізично добре вивченим явищем силової електротехніки: ємнісний зв'язок із контактною мережею та індуктивний зв'язок через поздовжню ЕРС, наведену тяговим струмом, є двома класичними механізмами взаємного впливу паралельних високовольтних ліній, які традиційно враховують для проєктування захисту ліній автоматики, прокладених поблизу тягової мережі змінного струму 25 кВ. Отже, для ВЛ СЦБ можна виділити щонайменше два таких механізми взаємного впливу: ємнісний зв'язок контактної мережі з ВЛ СЦБ та індуктивний зв'язок тягового струму з ВЛ СЦБ; кількісне оцінювання обох ефектів для конкретної конфігурації лінії потребує розрахунку або натурного вимірювання. Це є важливим аргументом на користь додаткових галузевих вимог: завада на вході силового трансформатора живлення ЕЗ ЗА формується вже в інфраструктурі перед обладнанням, тоді як стандартне випробування порту електронного засобу починається фактично з уже заданого випробувального рівня.

Додатковим, добре відомим у галузі джерелом завад є процес струмознімання: дуга в контакті «пантограф — контактний провід» формує швидкі перехідні електромагнітні процеси, що впливають, зокрема, на GSM-R [18]. Це джерело спільне для різних залізниць; національно специфічною є саме інфраструктура, через яку цей широкосмуговий вплив поширений до ЕЗ ЗА — контактна мережа, ДПР чи ВЛ СЦБ, трансформатор ОМ і порт живлення, а також рейкова і заземлювальна інфраструктура як паралельні шляхи.

Особливого значення набуває рейкова мережа. У системі ДПР рейка безпосередньо входить до електричного кола; одночасно рейки беруть участь у поверненні тягового струму і є середовищем взаємодії з пристроями залізничної автоматики. Для низькочастотних задач модель рейки як провідника з малим активним опором у багатьох випадках є прийнятною. Сучасні дослідження підтверджують, що рівень завад у рейкових і сигнальних колах визначений спектральним складом тягового струму, параметрами рейкової лінії та умовами електромагнітного зв'язку [8–12]. Проте зі зростанням частоти повний імпеданс протяжної рейкової мережі визначають уже не лише активним опором: необхідно враховувати поздовжню індуктивність, розподілену ємність відносно землі, взаємний електромагнітний зв'язок і частотно-залежний розподіл струму в

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

перерізі провідника (скін-ефект). Тому низький опір рейки на постійному струмі або промисловій частоті не є достатнім доказом того, що цей самий тракт буде низькоімпедансним через відведення завади на частотах десятків і сотень мегагерц.

5.3. Силкові трансформатори ОМ як канал проникнення завад

Одним із характерних інфраструктурних каналів проникнення завад до ЕЗ ЗА є силкові трансформатори типу ОМ, через які здійснюється живлення апаратури від протяжних ВЛ або ДПР. Гальванічне розділення первинної та вторинної обмоток не усуває високочастотного зв'язку між ними, який визначений паразитними міжобмотковими та обмотка-корпус ємностями.

Практична значущість такого механізму для залізниць України показана в попередньому дослідженні автора з А. О. Єлізаренком для специфічних національних завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц [14]: сигнали цих частот безпосередньо впорскувані у високовольтні лінії електроживлення систем ЗА (ДПР 27,5 кВ, ВЛ СЦБ 6/10 кВ), а параметри ВЧ-загороджувачів, силових трансформаторів, паразитні ємності, заземлення і стан баласту визначають, наскільки ефективно ця завада передана далі на порти живлення ЕП ЗА. У цій роботі такі результати використано як підтвердження принципового положення: трансформатор ОМ може бути високочастотним каналом між протяжною високовольтною мережею та портом живлення 230 В ЕЗ ЗА.

Додаткового дослідження потребує інший можливий шлях. За електричного зв'язку бака ОМ із рейковою та заземлювальною мережею через середню точку ДТ частина високочастотної завади потенційно може бути поширена за трактом ВЛ/ДПР → ОМ → бак/заземлення → СТ ДТ, тобто паралельно каналу

через порт живлення. Цей другий канал потребує експериментального підтвердження і розглянутий у наступному підрозділі.

5.4. Дросель-трансформатор як потенційний високочастотний канал проникнення завад

Середня точка ДТ є важливим вузлом рейкової та заземлювальної інфраструктури. Традиційне уявлення про відведення струму із СТ ДТ через рейкову мережу є достатнім для багатьох низькочастотних задач, але не може бути автоматично перенесено на швидкі імпульсні та радіочастотні процеси (рис. 2).

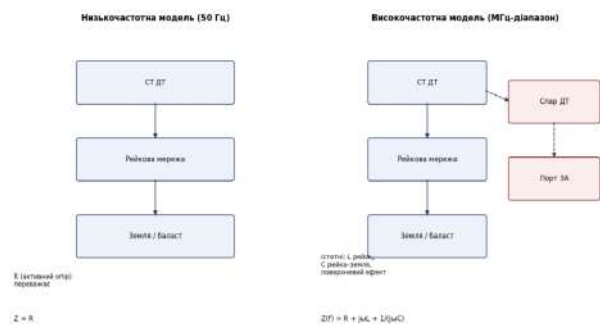


Рис. 2. Концептуальна відмінність низькочастотного та високочастотного подання рейково-заземлювальної інфраструктури ЕЗ ЗА

У МГц-діапазоні зростає роль паразитних міжобмоткових і обмотка-корпус ємностей ДТ, тоді як повний імпеданс рейок і протяжних заземлювальних провідників визначений не тільки їхнім активним опором. Тому низькоомне заземлення на промисловій частоті не є автоматично низькоімпедансним високочастотним заземленням.

Параметрична оцінка для $C_{\text{пар}} = 100\text{--}2000$ пФ показує швидке зменшення ємнісного опору зі зростанням частоти (рис. 3).

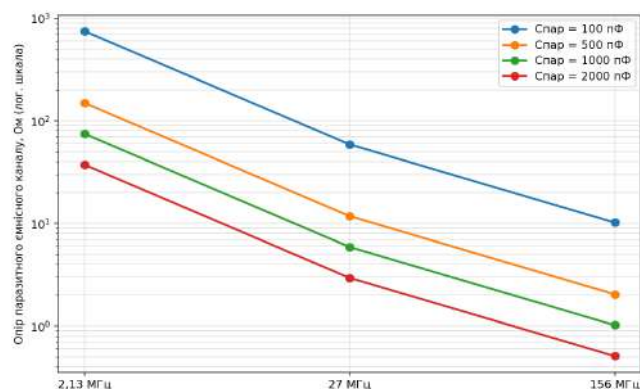


Рис. 3. Розрахункова частотна залежність опору паразитного ємнісного каналу ДТ

Особливо несприятливим може бути поєднання промерзання баласту і контуру заземлення з утворенням конденсату на корпусах ДТ і

трансформаторів ОМ. За таких умов одночасно змінюються імпеданси рейково-заземлювального

тракту і паразитні параметри високочастотних каналів проникнення завад.

Для оцінювання реального впливу різних типів ДТ доцільно передбачити експериментальне дослідження їхньої частотної передавальної характеристики для різних видів електротяги та схем заземлення.

5.5. Сезонна зміна параметрів каналів поширення завад

Електричні параметри тракту «рейка - баласт - ґрунт» залежать від температури та вологості. Промерзання не є самостійним джерелом завади, але може змінювати співвідношення комплексних імпедансів паралельних шляхів її поширення (експоненціальна залежність питомого опору мерзлого ґрунту від температури підтверджена багатьма дослідженнями, наприклад роботою [19]) і потребує врахування у МГц-діапазоні разом з індуктивністю і поверхневим ефектом рейкової мережі.

Протилежний за характером кліматичний сценарій пов'язаний із підвищеною вологістю і конденсатом. У попередньому дослідженні автора з А. А. Прилипком показано збільшення паразитної ємності між провідниками, між провідником і корпусом і в елементах гальванічної розв'язки за дії вологи, одночасно зі зменшенням опору ізоляції [15]. Отже, кліматичні фактори можуть змінювати не тільки надійність окремих елементів, але і передавальні властивості каналів проникнення електромагнітних завад, що обґрунтовує необхідність проведення частини вимірювань для характерних сезонних умов експлуатації.

Принципово важливо, що йдеться не про одноразовий вплив, а про повторюваний цикл: апаратура ЗА в колійному ящику чи релейній шафі, на відміну від приміщення з контрольованим кліматом, регулярно зазнає промерзання і відтавання взимку та конденсації і нагріву влітку — цей плавний сезонний фон накладається на короткочасні імпульсні впливи іншої природи (грозова перенапруга — від десятків мікросекунд до секунд; сеанс поїзного радіозв'язку 2,13/2,15 МГц чи іскріння пантографа - від секунд до кількох хвилин; розмова по мобільному телефону чи службовій радіостанції під час пошуку несправності електромеханіком СЦБ - до десятків хвилин). Кожна окрема подія рідко є причиною відмови, але кумулятивна дія сукупності таких плавних та імпульсних факторів формує додаткову складову інтенсивності відмов, яка зростає протягом терміну служби, а не є сталою величиною (рис. 4).

5.6. Кількісний вплив накопиченої деградації елементів за дії електромагнітних завад

на функційну безпечність електронних засобів залізничної автоматики

Електромагнітний вплив на електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) не обмежений короткочасним збоєм або миттєвим фізичним пошкодженням. Повторювані кондуктивні, імпульсні та радіочастотні завади в поєднанні з температурою, вологістю, конденсатом та іншими експлуатаційними факторами можуть створювати тривалий електричний і тепловий стрес елементної бази. Окрема подія може не призводити одразу до відмови, однак сукупний вплив протягом терміну експлуатації здатний проявитися параметричним дрейфом характеристик напівпровідникових компонентів, елементів захисту, ізоляції та гальванічної розв'язки і, як наслідок, збільшенням фактичної інтенсивності небезпечних відмов як окремих каналів резервування, так і ЕЗ ЗА і цілому.

Для кількісного аналізу розглянемо дві базові резервовані структури ЕЗ ЗА: дубльовану структуру 2 з 2 за логікою «І» (2002) і мажоритарну структуру 2 з 3 (2003). Спочатку розглядають лише незалежні небезпечні відмови каналів. Відмови зі спільної причини (CCF) і β -фактор мають бути розглянуті окремо, оскільки вони порушують вихідне припущення про незалежність каналів.

Нормативною основою для структури 2002 є ДСТУ EN 50129 [21] (EN 50129:2018), додаток В, п. В.2.2 «Composition of two independent items». Для двох однакових незалежних каналів резервування стандарт наводить апроксимацію асимптотичної інтенсивності небезпечних функційних відмов:

$$FFR_{2002} = 2FR_0^2SDT, \quad (1)$$

де FFR_{2002} (Functional Failure Rate) — результуюча інтенсивність небезпечних відмов дубльованої структури 2002, FFR нормативний показник за стандартом;

FR_0 (Failure Rate) — початкова інтенсивність небезпечних відмов одного каналу;

SDT (Safe Down Time) — сумарний безпечний час від виникнення відмови до її виявлення (часу діагностики T_d) і нейтралізації (часу усунення T_u).

Формулу (1) застосовують за приблизним рівнянням, за умови $FR \cdot SDT < 0,1$ і можливості нехтування небезпечними CCF. Коефіцієнт 2 враховує найгірші, максимальні значення інтенсивностей небезпечних відмов каналів резервування наприкінці

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

інтервалу SDT . Для мажоритарної структури 2003 нормативну основу доповнює ІЕС 61508-6:2010, додаток В, п. В.3.3.2.5 «2003». Повна формула FFR для цієї архітектури містить коефіцієнт 6 при складовій, пов'язаній із комбінацією незалежних небезпечних відмов. У спрощеному поданні незалежної складової, прийнятому для порівняльного аналізу, інтенсивність небезпечних функційних відмов такої мажоритарної структури ЕЗ ЗА має вигляд

$$FFR_{2003} = 6FR_0^2 SDT. \quad (2)$$

Формулу (2) застосовують також за приблизним рівнянням, за умови $FR \cdot SDT < 0,1$ і можливості нехтування небезпечними ССФ. Аналогічні моделі (1) і (2) використовували в Україні і до ухвалення міжнародних і європейських стандартів для доказу функціональної безпечності ЕЗ ЗА (тільки з іншими позначеннями).

Формула (2) не є дослівним переписуванням повної формули ІЕС 61508-6; вона використовується тут як спрощене подання її незалежної складової для однакових каналів.

Отже, базові залежності для подальшого аналізу можна подати як

$$FFR_{2002} = 2FR_0^2 SDT; \\ FFR_{2003} = 6FR_0^2 SDT. \quad (3)$$

Для опису поступового погіршення стану елементної бази за дії повторюваних експлуатаційних стресів введемо безрозмірний коефіцієнт деградації κ . Він не є нормативним параметром EN 50129 або ІЕС 61508, а використовуваний як узагальнений параметр дослідження:

$$\kappa = FR\kappa / FR_0; FR\kappa = \kappa \cdot FR_0; \kappa \geq 1. \quad (4)$$

Значення $\kappa = 1$ відповідає вихідному розрахунковому стану каналу. Значення $\kappa > 1$ означає, що внаслідок накопиченої деградації

фактична інтенсивність небезпечних відмов каналу стала в κ разів більшою. При цьому конкретна залежність κ від напруженості поля, амплітуди кондуктивної завади, кількості імпульсів і часу експлуатації в цій роботі не постульована як нормативна: вона має бути визначена експериментально або за достовірною експлуатаційною статистикою.

На рис. 4. наведено вплив повторюваних завад і погіршення ізоляції між елементами структури ЕЗЗА на коефіцієнт деградації $\kappa(t)$. Графік не є експериментальною залежністю $\kappa = f(t)$, він показує механізм можливої його реальної зміни в процесі експлуатації.

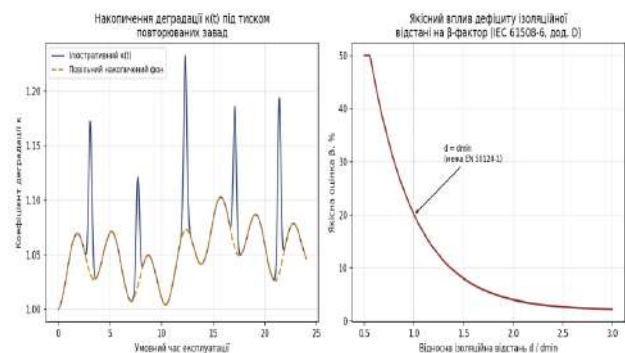


Рис. 4. Ілюстративне подання «тиску» повторюваних завад на коефіцієнт деградації $\kappa(t)$ (ліворуч) і якісний вплив дефіциту ізоляційної відстані на β -фактор за базовою методикою ІЕС 61508-6, додаток D (праворуч)

Підставляючи вираз (4) у базові залежності (3), отримуємо

$$FFR_{2002} = 2\kappa^2 FR_0^2 SDT; \quad (5)$$

$$FFR_{2003} = 6\kappa^2 FR_0^2 SDT \quad (6)$$

Звідси для кожної з розглянутих архітектур відносно збільшення незалежної складової інтенсивності небезпечних функційних відмов визначена однаково:

$$FFR(\kappa) / FFR(1) = \kappa^2. \quad (7)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, лінійне збільшення інтенсивності небезпечних відмов окремого каналу в κ разів унаслідок накопиченої деградації спричиняє квадратичне у κ^2 разів збільшення незалежної складової інтенсивності небезпечних функційних відмов резервованої структури (рис. 5). На рисунку по осі ординат показано нормовану величину $FFR/(FR_0^2 \cdot SDT)$. Наприклад, $\kappa = 1,5$ відповідає збільшенню цієї складової у 2,25 раза, $\kappa = 2$ - у 4 рази, $\kappa = 3$ - у 9 разів. У разі більшого енергетичного впливу електромагнітних завад, наприклад унаслідок грозових перенапружень, які не спричинили миттєвих відмов елементів, ці коефіцієнти здатні змінити інтенсивність небезпечних відмов в сотні і навіть тисячі разів. При цьому сертифікаційні рівні функціональної безпеки SIL3 чи SIL4 і безпека руху поїздів будуть змінені до недопустимих значень.

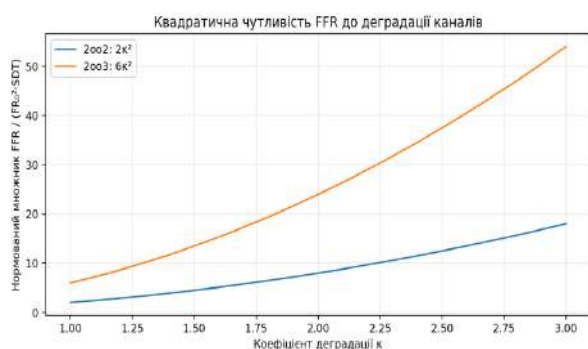


Рис. 5. Квадратична чутливість FFR до коефіцієнта деградації κ для базових структур ЕЗ ЗА 2002 і 2003

Рис. 5 показує однаковий квадратичний характер деградації для обох структур; більший коефіцієнт (6 проти 2) для 2003 відображає лише прийняту спрощену модель і не означає, що ця структура «втричі менш безпечна» — повна оцінка залежить ще і від діагностичного покриття, режиму відновлення та інших припущень.

Із позиції впливу електромагнітних завад отриманий результат має такий зміст: для погіршення функційної безпечності не обов'язково, щоб завада одразу призвела до фізичного руйнування елемента. Якщо повторювані впливи поступово збільшують FR каналу, резервована структура реагує на цю зміну нелінійно. Саме тому під час оцінювання EMC ЕЗ ЗА SIL 3/SIL 4 доцільно поряд із критерієм відсутності миттєвої небезпечної реакції досліджувати можливість накопиченої деградації елементної бази та підтверджувати збереження розрахункових показників FR протягом установленого терміну експлуатації.

Математичний ланцюг першого механізму впливу можна подати як

повторювані ЕМ – завади $\rightarrow$
 накопичена деградація $\rightarrow \kappa > 1 \rightarrow$
 $FR\kappa = \kappa \cdot FR_0 \rightarrow FFR_{ind} \propto \kappa^2$

(8)

Важливо, що цей висновок стосується саме незалежної складової відмов. Якщо одна й та сама електромагнітна причина здатна одночасно впливати на декілька каналів, припущення про їхню незалежність порушено. Такий механізм потрібно розглядати окремо як CCF із застосуванням β -фактора; він є предметом наступного підрозділу.

5.7. Вплив електромагнітних завад на відмови зі спільної причини (CCF) і β -фактор

Моделі попереднього підрозділу виходять із незалежності відмов каналів. Для ЕЗ ЗА це припущення потребує окремого підтвердження: одна зовнішня електромагнітна причина здатна одночасно впливати на декілька каналів або проникати до одного комплексу різними інфраструктурними шляхами (живлення, сигнальні кола, заземлення, ОМ, СТ ДТ). Такий механізм відповідає відмові за спільною причиною (CCF), яка підлягає розгляду за ДСТУ EN 50129.

Для кількісного оцінювання апаратних CCF застосовують методику β -фактора IEC 61508-6, додаток D. Незалежна і спільна складові інтенсивності небезпечних відмов виражені як

$$FR_{ind} = (1 - \beta)FR; FR_{CCF} = \beta FR.$$

Важливий інженерний наслідок: незалежна складова FFR пропорційна FR^2 (вирази (5), (6)), тоді як складова CCF — лише $\beta \cdot FR$, тобто величина першого порядку. Співвідношення цих доданків не є сталим: точка переходу $FR_{crit} \approx \beta / (2 \cdot SDT)$, після якої переважає квадратична складова, залежить від SDT на кілька порядків — за малого SDT (швидке гарантоване відновлення) навіть незначний β може домінувати вже для високонадійних каналів, тоді як за великого SDT переважає квадратична складова навіть за малих β . Крім того, оскільки CCF-складова зростає з деградацією лише лінійно ($\beta \cdot \kappa \cdot FR_0$), а незалежна складова — квадратично ($\kappa^2 \cdot FR_0^2 \cdot SDT$), для достатнього накопичення деградації (зростання κ)

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

квадратичний доданок рано чи пізно переважає незалежно від початкового співвідношення. Отже, жодне підвищення надійності елементної бази не компенсує недостатнього фізичного розділення каналів лише за умови малого SDT і обмеженої деградації; за значного SDT або суттєвої деградації визначальним стає саме квадратичний доданок.

На рис. 6 показано вплив β -фактора на FFR структур 2oo2 і 2oo3 для реального каналу ($FR = 10^{-7}$

год⁻¹, $SDT = 5$ років) у найгіршому за ІЕС 61508-6, додаток D, діапазоні β (1-10 %). Для $\beta = 0$ різниця між структурами точно відповідає співвідношенню коефіцієнтів (6 проти 2, тобто рівно втричі); зі зростанням β лінійний CCF-доданок, однаковий для обох структур, починає домінувати, і ця відмінність нівелюється.

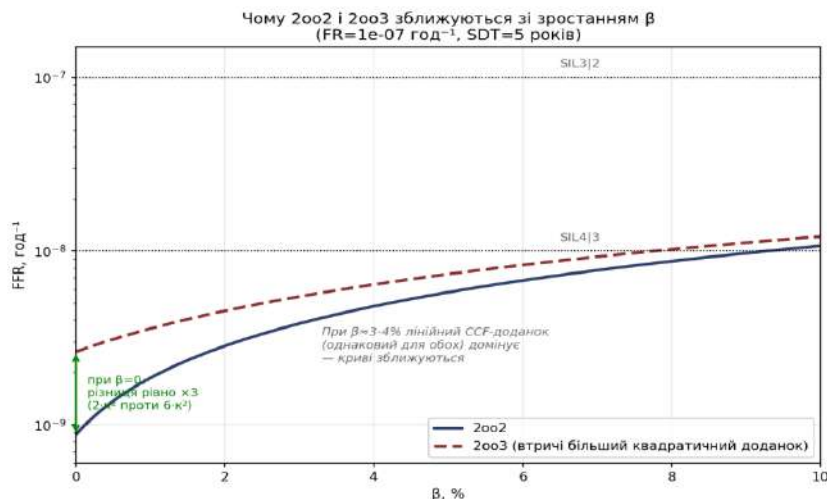


Рис. 6. Порівняння FFR структур 2oo2 і 2oo3 залежно від β : для $\beta = 0$ різниця точно втричі, зі зростанням β лінійний CCF-доданок домінує, і криві зближуються

($FR = 10^{-7}$ год⁻¹, $SDT = 5$ років)

Незначна відмінність між сумарними значеннями FFR структур 2oo2 і 2oo3 зі збільшенням β -фактора є закономірною. У прийнятій моделі архітектури відрізняються незалежною складовою небезпечних відмов, тоді як складова відмов за спільною причиною (CCF) є спільною для обох структур і зростає пропорційно β -фактору. Зі збільшенням β саме CCF-складова починає домінувати в сумарному FFR, тому відносний внесок відмінності між незалежними складовими 2oo2 і 2oo3 зменшується, а відповідні криві зближуються. Відмінність між структурами стає суттєвою за протилежних умов - коли незалежна складова стає співмірною з CCF-складовою або перевищує її. Цьому сприяють збільшення фактичного часу відновлення SDT , зростання інтенсивності небезпечних відмов окремого каналу FR і зменшення β -фактора. Саме тому за великого SDT , зокрема тривалого очікування планового усунення виявленої або прихованої відмови, різниця між структурами на рис. 6 стає значно виразнішою, тоді як за малого SDT і домінування CCF вона практично нівелюється. Фізично це означає, що за домінування CCF збільшення структурної надлишковості саме по собі не забезпечує пропорційного підвищення функціональної безпечності, оскільки одна спільна зовнішня причина, зокрема електромагнітний вплив,

потенційно може одночасно порушувати декілька резервованих каналів.

Із рис. 6 випливає і дзеркальний архітектурний висновок. Оскільки незалежний доданок 2oo2 утричі менший за 2oo3, для досягнення одного і того самого цільового FFR структура 2oo2 допускає канал із інтенсивністю відмов FR у $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза вищою (тобто гіршою), ніж структура 2oo3. Іншими словами, «кращий» на перший погляд рівень функціональної безпеки структури 2oo2 частково може бути досягнутий не за рахунок надійніших компонентів, а за рахунок простішої — подвійної, а не потрійної — мажоритарної логіки; це потрібно враховувати, порівнюючи вартість елементної бази різних архітектур для однакового цільового SIL.

Практичний висновок: оскільки CCF, за визначенням, розглядає одну зовнішню причину, здатну одночасно вражати декілька каналів, електромагнітна завада є типовим кандидатом на роль такої причини, а отже, оцінювання EMC ЕЗ ЗА має включати не лише перевірку окремого порту, а й аналіз можливості одночасного впливу на декілька резервованих каналів через спільні інфраструктурні шляхи. Кількісне встановлення β для конкретних конфігурацій ЕЗ ЗА є завданням окремого

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

дослідження; наведена вище залежність має виключно ілюстративний характер.

Тут слід зазначити про принципову асиметрію двох доданків формули (9). Квадратичний доданок $2 \cdot (1-\beta)^2 \cdot FR^2 \cdot SDT$ явно містить SDT, тому вплив накопиченої деградації можна компенсувати скороченням SDT — частішим гарантованим контролем і усуненням відмов. Натомість CCF-доданок $\beta \cdot FR$ від SDT не залежить узагалі: скільки б не скорочувати період контролю, це в жодному разі не зменшує внесок відмови за спільною причиною. Єдиний спосіб зменшити цей доданок — зменшити сам β , тобто підвищити фізичне розділення, різноманітність (різні виробники, технології, траси прокладання кабелів) і екранування резервованих каналів. Іншими словами, проти деградації ефективний швидкий контроль, а проти CCF — лише якісніше конструктивне розділення; підміна одного заходу іншим не працює.

Слід зазначити, що визначальні параметри цього співвідношення — SDT (з урахуванням часу гарантованого усунення, а не лише виявлення відмови) і коефіцієнт деградації k — на практиці не є нормативними: обидва потребують окремого обґрунтування для конкретної конфігурації апаратури, тому апіорне віднесення каналу до « β -домінантного» чи «деградаційно-домінантного» режиму є орієнтовним. Більш того, ці параметри взаємопов'язані: мале SDT досягне лише за умови автоматичної діагностики і усунення відмови, а засіб діагностики сам є електронною системою, що підлягає власній деградації за дії тих самих EMC-факторів — рекурсивний варіант проблеми «хто діагностує систему діагностики».

Обговорення результатів

Проведений аналіз показує, що необхідність національного доповнення вимог EMC не потрібно зводити до механічного підвищення рівнів жорсткості ДСТУ EN 50121-4: міжнародна нормативна база вже містить потрібні методи випробувань, а основна проблема полягає у визначенні репрезентативного сценарію впливу, каналу його проникнення та допустимої реакції функції. Це узгоджено з раніше отриманими результатами щодо завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц, де фактичний вплив на порт живлення визначено не самим джерелом, а елементами інфраструктурного тракту [14]; у цій роботі такий принцип розповсюджено на більше коло впливів і портів.

Передавання RF-завади через ДТ до сигнальних кіл залишається фізично обґрунтованою гіпотезою, а не доведеним експериментально фактом: параметричне зменшення емнісного опору на частотах порядку 156 МГц показує доцільність дослідження, але потребує вимірювання повної

передавальної характеристики реальних ДТ. Так само низькоомне заземлення на промисловій частоті не є доказом низького високочастотного імпедансу, а сезонна зміна властивостей баласту і ґрунту (підтверджена експериментально [19]) здатна змінювати співвідношення паралельних шляхів струму.

Із позиції функціональної безпечності найбільш несприятливим залишається багатофакторний вплив однієї зовнішньої причини (CCF) через ОМ і ДТ, оскільки він впливає на саме припущення про незалежність резервованих каналів [14, 15, 21]. Основним узагальненим результатом є перехід від підходу «нормований вплив → порт» до постановки «джерело → інфраструктурний канал → вплив на порт → реакція засобу → наслідок для ФБ», який доцільно покласти в основу подальших галузевих нормативних документів.

Пропозиції щодо додаткових галузевих вимог до ДСТУ EN 50121-4

Результати проведеного аналізу не дають підстав для механічного підвищення всіх установлених ДСТУ EN 50121-4 рівнів жорсткості. Для частини впливів міжнародні стандарти вже передбачають декілька рівнів або спеціальні методи випробувань. Завдання додаткових галузевих вимог полягає у визначенні умов їх застосування до ЕЗ ЗА України. До їхнього складу доцільно включити такі основні положення.

По-перше, необхідно класифікувати умови застосування обладнання за типом електропостачання, видом тяги, місцем установлення, характером підключених протяжних кіл і доступністю обладнання для персоналу. Це дасть змогу уникнути однакових підвищення вимог для принципово різних умов експлуатації.

По-друге, для радіочастотних впливів необхідно враховувати не тільки частоту і напруженість поля, але і тип джерела, форму сигналу та відстань до обладнання. Для обґрунтованого можливого близького розташування портативних передавачів доцільно передбачити застосування ІЕС 61000-4-39 і включення до випробувальної конфігурації кабелів, джгутів і периферійних пристроїв; конкретні числові рівні для радіочастотного середовища 150–156 МГц і СВ 27 МГц визначають у суміжному дослідженні і планують опублікувати після його завершення.

По-третє, для обладнання, підключеного через характерні залізничні інфраструктурні тракти, доцільно передбачити перевірку частотно-залежної передавання завади до порту, насамперед для ОМ, ДТ, протяжних кабелів, рейкової та заземлювальної мережі. Питання електростатичних розрядів (ESD),

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

динамічних змін живлення та грозових перенапруг, вимоги до яких лише частково закладено для ЕЗ ЗА у базовому стандарті EMC, потребують окремого критичного аналізу і є предметом додаткових досліджень прикладного спрямування.

Нарешті, для засобів, що реалізують функції SIL 3/SIL 4, доцільно послідовно застосовувати єдиний критерій безпечної реакції, сформульований у підрозділі про зв'язок EMC із функціональною безпечністю, до кожного з перелічених вище видів впливу, включно з перевіркою можливості одночасного впливу на декілька резервованих каналів.

Оскільки частина виявлених каналів має розрахункове або гіпотетичне обґрунтування, встановленню нових числових вимог має передувати галузева програма експериментальних досліджень: вимірювання частотної передавальної характеристики реальних типів ОМ і ДТ, комплексного імпедансу тракту рейка-земля за різних сезонних умов, рівнів динамічних змін напруги живлення, ESD-потенціалу персоналу та параметрів близького RF-впливу. Результатом такої програми має бути матриця «умови застосування → характерна завада → метод випробування → рівень → критерій реакції» як технічна основа для подальших галузевих нормативних документів.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що специфіка електромагнітного середовища електронних засобів залізничної автоматики України визначена не тільки рівнями зовнішніх завад, але і конфігурацією тягового і нетягового електропостачання, рейкової мережі, систем заземлення та інших протяжних структур, які формують фактичні канали проникнення завад до електронних портів.

2. Попередні дослідження проникнення завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц підтвердили практичну значущість інфраструктурного каналу через силові трансформатори ОМ до портів живлення. У цій роботі обґрунтовано необхідність розширення такого підходу на інші джерела, частоти і порти без повторення раніше отриманих результатів.

3. Висунуто гіпотезу про можливість височастотного передавання завади від рейково-заземлювальної інфраструктури через СТ ДТ і паразитні параметри ДТ до сигнальних кіл. Параметричні оцінки підтверджують доцільність такого дослідження, однак для кількісного оцінювання необхідне експериментальне визначення частотної передавальної характеристики реальних типів ДТ.

4. Показано необхідність урахування сезонної зміни каналів поширення завад. Промерзання баласту

і ґрунту може змінювати співвідношення імпедансів паралельних шляхів струму, тоді як вологість і конденсат впливають на опір ізоляції, паразитні ємності та характеристики захисних елементів.

5. Для ЕЗ ЗА із високими рівнями безпеки SIL 3/SIL 4 критерієм EMC має бути не тільки збереження працездатності або відсутність фізичного пошкодження, але і відсутність хибної команди, помилкового контрольного стану, прихованої втрати діагностики та спільного впливу на резервовані канали. Одна зовнішня електромагнітна причина, що проникає через декілька портів, має бути врахована для аналізу CCF.

6. Обґрунтовано, що додаткові галузеві вимоги щодо ДСТУ EN 50121-4 доцільно формувати не як таблицю загальнопідвищених рівнів В/м, кВ або В, а як систему правил вибору випробувального сценарію, ступеня жорсткості, конфігурації випробування та критерію реакції, пов'язаного з безпекою, залежно від реального середовища застосування; числові значення цих вимог мають бути установлені за результатами галузевих натурних і лабораторних досліджень.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту : Постанова КМУ від 11.07.2013 р. № 494 (ред. від 03.05.2026 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF> (дата звернення: 26.08.2026)
2. Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу : Постанова КМУ від 30.12.2015 р. № 1194 (ред. від 03.05.2026 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF> (дата звернення: 26.08.2026)
3. Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України : Закон України від 09.06.2026 р. № 4904-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20> (дата звернення: 26.08.2026)
4. ДСТУ EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 4. Випромінювання та несприйнятливість апаратури сигналізації та зв'язку. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. prEN 50121-4:2025. Railway applications — Electromagnetic compatibility — Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. CENELEC, Project 79750, draft, August 2025. URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/projects/2025-02602> (дата звернення: 04.09.2026)
6. FprEN 50121-4:2026. Railway applications — Electromagnetic compatibility — Part 4: Emission and

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- immunity of the signalling and telecommunications apparatus. CENELEC, Project 79750, Final Draft, 2026. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/c928dca3-cc46-46d2-ba7f-27c534b624fd/fpren-50121-4-2026> (дата звернення: 04.09.2026)
7. IEC 61000-4 (series). Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4: Testing and measurement techniques. Geneva : IEC.
8. Havryliuk, V. Investigation of the Influence of Traction Current Harmonics on Automatic Locomotive Signaling. *2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2025. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169221>
9. Havryliuk, V., Radzikhovskiy, K., Voznyak, O. Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. Art. 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004>
10. Havryliuk, V., Nibaruta, R. Choice of the Parameters of an EMI Monitoring System for an AC Traction Network. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. IEEE, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078179>
11. Garczarek, A., Stachowiak, D. Measurements and Analysis of Electromagnetic Compatibility of Railway Rolling Stock with Train Detection Systems Using Track Circuits. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 11. Art. 2705. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112705>
12. Fu, Z., Tan, C., Gong, J. Electromagnetic coupling interference modeling of high-speed railway track circuits: implications for wireless sensor networks in industry 4.0 IoT. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8. Art. 72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08082-y>
13. Серченко, М. С. Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям : дис. ... д-ра філософії : 273 Залізничний транспорт / Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2026. Державний реєстраційний номер 0826U002607. URL: <https://ust.edu.ua/nauka/specjalizovani-vcheni-rady/razovi-specjalizovani-vcheni-rady-phd/273-zaliznychnyj-transport/>
14. Кустов, В. Ф., Єлізаренко, А. О. Нормування і вплив завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц на порти живлення електронних пристроїв СЦБ рівнів SIL ¾. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2026. Вип. 216. DOI: 10.18664/1994-7852.216.2026.362481
15. Кустов, В. Ф., Прилипка, А. А. Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 2. С. 144–158. DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.336437
16. Кустов, В. Ф. Основи теорії надійності та функціональної безпечності систем залізничної автоматики : навч. посіб. Харків : УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
17. Кустов, В. Ф. Фундаментальні недоліки базових моделей небезпечних відмов для розрахунку функціональної безпеки систем керування рухом поїздів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2025. Вип. 212. С. 301–314. DOI: 10.18664/1994-7852.212.2025.336537
18. Boschetti, G., Mariscotti, A., Deniau, V. Assessment of the GSM-R susceptibility to repetitive transient disturbance. *Measurement*. 2012. Vol. 45, No. 9. P. 2226–2236. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.04.004
19. Shan, W., Liu, Y., Hu, Z., Xiao, J. A Model for the Electrical Resistivity of Frozen Soils and an Experimental Verification of the Model. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 119. P. 75–83. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.07.010
20. Boteler, D. H. Modeling Geomagnetic Interference on Railway Signaling Track Circuits. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, No. 1. e2020SW002609. DOI: 10.1029/2020SW002609
21. EN 50129:2018. Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety related electronic systems for signalling. Brussels : CENELEC, 2018.
22. Про затвердження Правил безпечної експлуатації контактної мережі та пристроїв електропостачання автоблокування залізниць : Наказ МНС України від 13.01.2012 р. № 19 ; зареєстр. в Мін'юсті України 03.02.2012 р. за № з0175-12.
23. Земський, Д. Р. Експериментальне дослідження якості електроенергії у споживачів, що живляться від лінії ДІП 27,5 кВ залізниць змінного струму. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 1 (136). С. 66–71.
24. Panchenko, S., Bojnik, A., Kustov, V., Sotnyk, V. Ensuring Railroad's Digital Automation Systems Resistance to Dangerous States. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. Lecture Notes in Intelligent*

Transportation and Infrastructure. Springer, Cham, 2020. P. 112–120. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6_17

25. EN 50124-1:2017. Railway applications — Insulation coordination — Part 1: Basic requirements — Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment. Brussels : CENELEC, 2017.

26. IEC 61000-4-39:2017. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-39: Testing and measurement techniques — Radiated fields in close proximity — Immunity test. Geneva : IEC, 2017.

27. IEC 61508-6:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3. Geneva : IEC, 2010.

Features of the electromagnetic environment and disturbance penetration channels into electronic railway signalling equipment of Ukraine under new technical safety regulations

Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Methodology. The study applies a channel-based approach: for each disturbance source, the physical infrastructure channel of its penetration to a specific equipment port is identified separately from the source, and the functional consequence is assessed against a unified safety-related reaction criterion. Established facts are explicitly distinguished from physically justified hypotheses requiring dedicated measurement, and an immunity-margin coefficient comparing measured disturbance levels with EN 50121-4 test levels is introduced as a decision tool.

Results. The OM-transformer channel of RF penetration to the power port, previously confirmed for 2.13/2.15 MHz train radio interference, is generalised to 6/10 kV power lines, the 27.5 kV booster system, and the rail-ground path with its seasonal variation. A physically justified hypothesis of high-frequency signal penetration through the impedance-bond midpoint to signalling circuits is formulated as a common-cause failure concern. It is shown that the hazardous functional failure rate (FFR) of redundant architectures depends approximately on the square of the component degradation factor, and that insulation-coordination deficits contribute to the beta-factor linearly rather than quadratically, which can dominate the resulting hazardous-failure rate for high-reliability components. A structured comparison procedure based on a quantified immunity-margin coefficient is proposed as the technical basis for further normative work.

Scientific novelty. For the first time, a unified infrastructural-channel taxonomy is proposed for the national electromagnetic environment of Ukrainian railway automation, linking disturbance sources to penetration paths and functional-safety consequences. The immunity-margin coefficient formalises a measurement-based alternative to the a priori increase of EN 50121-4 severity levels, and the quadratic versus linear sensitivity of the hazardous functional failure rate to component degradation and to insulation-coordination deficits, respectively, is established for the first time in this national context.

Practical significance. The proposed channel-based structure and comparison procedure can be used by designers, certification bodies and standardisation working groups when preparing additional normative requirements for DSTU EN 50121-4, providing a prioritised programme of field and laboratory measurements instead of an arbitrary increase of test levels. The results apply both to new SIL 3/SIL 4 signalling equipment and to EMC audits of equipment already in operation.

Keywords: electromagnetic compatibility, railway signaling, functional safety, SIL 3, SIL 4, EN 50121-4, impedance bond, OM power transformer, immunity margin, industry standards.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>.

Viktor Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Automation and Computer-Aided Train Traffic Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-9773-5470>.

Стаття надійшла 01.09.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 26.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії

Creative Commons Attribution License International CC-BY.

ШЕВЧЕНКО В. І., к.т.н., доцент,
ЛАВРУХІН О. В., д. т. н., професор

VirtLab: концепція модульної цифрової освітньої екосистеми для професійної та STEM-підготовки фахівців транспортної галузі

Анотація. Стрімка цифровізація вищої освіти потребує єдиного цифрового середовища, що поєднує практичну підготовку, самостійне навчання та контроль знань, оскільки наявні рішення (LMS, Google Classroom, окремі віртуальні лабораторії) вирішують лише локальні завдання. У статті подано авторську концепцію цифрової освітньої екосистеми VirtLab, розроблену на кафедрі управління вантажною і комерційною роботою УкрДУЗТ, — модульного середовища, що об'єднує віртуальні лабораторії, електронні посібники, мультимедійні та інтерактивні ресурси, електронну бібліотеку та елементи AI-консультування. Педагогічне підґрунтя спирається на конструктивізм, соціоконструктивізм, компетентнісний та особистісно-орієнтований підходи, принципи STEM-освіти. Наукова новизна — єдиний модульний принцип побудови різномірних освітніх ресурсів і універсальний шаблон багатоформатного навчального модуля. Практична цінність роботи полягає у створенні та діючій реалізації уніфікованого цифрового середовища, яке розв'язує проблему відсутності комплексного лабораторного практикуму для дистанційного та змішаного навчання. Застосування єдиного модульного шаблону і радіальної архітектури дає змогу безпечно відпрацьовувати складні та потенційно небезпечні виробничі операції транспортної галузі, суттєво зменшує ресурсні витрати на організацію навчального процесу і забезпечує легке масштабування освітніх і STEM-ресурсів на інші дисципліни і заклади освіти.

Ключові слова: цифрова освіта, віртуальна лабораторія, STEM, інтерактивне навчання, цифрова освітня екосистема, електронний посібник, модульне навчання, транспортна освіта, цифрова трансформація, компетентнісний підхід, штучний інтелект в освіті.

Вступ

Застосування новітніх інформаційно-комунікаційних технологій є характерною рисою сучасності для закладів вищої освіти. Для підвищення якості освітнього процесу, а саме забезпечення доступності освіти, її відповідності вимогам ринку праці, а також посилення індивідуалізації та диференціації навчання, заклади вищої освіти запроваджують передові технолого-педагогічні заходи, які дають змогу значно підвищити рівень цифрової компетентності здобувачів, вийти на безпрецедентно новий рівень організації освітньої діяльності, унеможливити ризики неефективного використання цифрових ресурсів, забезпечити побудову прозорої та ефективної системи цифрової трансформації освітнього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що цифрова трансформація освіти — це не поодинокі технічні рішення, а стратегічний напрям трансформації системи освіти, який передбачає використання цифрових технологій задля посилення індивідуалізації, диференціації навчання та розвитку цифрової компетентності здобувачів і викладачів [1 – 4]. Водночас практика показує, що наявні цифрові рішення здебільшого вирішують окремі, вузько локалізовані завдання. Системи управління навчанням (Learning Management Systems, LMS) на кшталт Moodle чи Canvas добре пристосовані для розміщення матеріалів курсу, керування завданнями та

оцінювання, але не призначені для повноцінного відтворення практичної, лабораторної складової підготовки фахівця. Сервіси, подібні Google Classroom, є зручними для організації навчальної комунікації, проте поступаються повноцінним LMS у глибині педагогічних інструментів, адмініструванні програм і сертифікації [5]. Окремі віртуальні лабораторії та STEM-платформи, зокрема, зазвичай є ізольованими продуктами одного постачальника чи однієї дисципліни і не інтегровані в єдиний освітній простір закладу.

Для транспортної галузі, де підготовка фахівця традиційно спирається на практичні та лабораторні роботи, тренажерну підготовку і аналіз виробничих ситуацій, дефіцит комплексних цифрових рішень є особливо відчутним. Обмежений доступ до дорогого обладнання, потреба в безпечному відпрацюванні небезпечних або рідкісних операцій, а також необхідність практико-орієнтованого навчання в умовах дистанційного чи змішаного формату формує запит на цифрове середовище, здатне поєднати лабораторний практикум, електронні посібники, мультимедійний контент і засоби контролю знань в одній системі.

Відповідно до умов сучасного освітнього процесу, існують окремі цифрові рішення: LMS, сервіси відеоконференцій, поодинокі віртуальні лабораторії, однак це не забезпечує єдиного, модульного та масштабованого цифрового освітнього середовища, здатного одночасно охоплювати

© ШЕВЧЕНКО В. І., ЛАВРУХІН О. В., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

практичну підготовку, самостійне навчання, контроль знань і консультаційну підтримку здобувачів у межах однієї транспортної спеціальності чи закладу освіти в цілому.

Визначення мети та завдання дослідження.

Необхідність змін у системі підготовки фахівців транспортної галузі диктує необхідність цифрової трансформації основних процесів організації освітнього процесу. На сьогодні удосконалення лише окремих цифрових інструментів не відповідає сучасним вимогам, і відповідно прийняті програми так званої цифрової трансформації основних освітніх процесів, які насамперед націлені на підвищення рівня автоматизованого обслуговування здобувачів, є недостатніми. Проблема сучасних цифрових рішень полягає в тому, що, розробляючи системи, урахували старі підходи, за старою технологією, яка сьогодні не влаштовує ринок праці. Для виправлення ситуації заклади вищої освіти планують замінити ізольовані цифрові рішення на систему з організації освітнього процесу, яка базуватиметься на інтеграції з іншими учасниками освітнього процесу (викладачів, здобувачів, адміністраторів, роботодавців) і буде перспективним напрямом розвитку цифрових освітніх платформ, особливим напрямом якої стане можливість замовляти не тільки навчальні матеріали, а й інші послуги (лабораторні роботи, тренажери, консультації, сертифікацію). Тобто планують перехід від системи «Розміщення матеріалів» до системи «Освітнього середовища» з автоматизацією всього «процесу організації навчання – від заявки на курс до можливого отримання сертифіката».

Отже, проблема, яку покликана розв'язати ця робота, полягає в тому, що існуючі окремі цифрові рішення (LMS, сервіси відеоконференцій, поодинокі віртуальні лабораторії) не забезпечують єдиного, модульного та масштабованого цифрового освітнього середовища, здатного одночасно охоплювати практичну підготовку, самостійне навчання, контроль знань і консультаційну підтримку здобувачів у межах однієї транспортної спеціальності чи закладу освіти в цілому.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Сучасний стан професійної та STEM-підготовки фахівців транспортної галузі формується під впливом кількох взаємопов'язаних тенденцій: цифровізації освітнього середовища, впровадження модульних принципів побудови навчальних програм, розвитку віртуальних лабораторій і симуляцій, а також інтеграції міждисциплінарних підходів на основі STEM. У цьому контексті концепція VirtLab як модульної цифрової освітньої екосистеми обґрунтована через аналіз наявних досліджень і практик у сферах віртуальних лабораторій, модульної освіти, цифрових екосистем і STEM-підготовки для транспортної індустрії.

Цифрова трансформація освіти і розвиток цифрових екосистем

Дослідження вказують, що цифровізація освіти є стратегічним пріоритетом для України, особливо в умовах воєнного стану та євроінтеграційних процесів [6]. Акцент зроблено на створенні єдиного функціонального освітнього середовища, де всі елементи навчального процесу від доступу до матеріалів і комунікацій, зворотного зв'язку та аналізу результатів пов'язані в цифрову екосистему [7 – 10]. Такий підхід відповідає ідеї VirtLab як інтегрованої платформи, що поєднує модульні освітні ресурси, віртуальні лабораторії, інструменти оцінювання і аналітики в єдину систему.

У науковій літературі зазначено про необхідність формування інтерактивних мультимедійних освітніх ресурсів із відкритим доступом для закладів освіти, що також узгоджується з концепцією модульної екосистеми, орієнтованої на гнучкість і масштабованість. Порівняльні дослідження систем управління навчанням (LMS) Moodle, Canvas і Google Classroom показують, що кожна з цих платформ має власну нішу застосування, проте жодна не забезпечує повноцінної інтеграції лабораторного практикуму, мультимедійного контенту і засобів контролю знань у єдиній архітектурі [5]. У межах Українського державного університету залізничного транспорту дистанційне навчання вже нині організовано комбіновано: асинхронно через LMS Moodle для технічних і економічних спеціальностей і Google Classroom для гуманітарних, а синхронно через сервіси відеоконференцій [11]. Це підтверджує як затребуваність цифрових інструментів, так і фрагментарність їх використання в межах одного закладу.

Модульний принцип організації навчального змісту

Модульна побудова навчальних програм є головним трендом у сучасній професійній і STEM-освіті. Зокрема, у методичних рекомендаціях щодо розвитку STEM-освіти запропоновано використання модульних курсів або додаткових модулів до існуючих предметів, що дає змогу поступово інтегрувати нові технології та практико-орієнтовані завдання [12, 13]. У контексті підготовки фахівців транспортної галузі модульність дає змогу поєднувати теоретичні блоки з практичними симуляціями, віртуальними лабораторіями та кейс-стаді, адаптуючи програми до конкретних потреб підприємств і ринку праці.

Дослідження також засвідчують, що модульний підхід сприяє інтеграції змісту кількох предметів у межах одного модуля, що особливо актуально для міждисциплінарної STEM-підготовки, де поєднані інженерія, технології, математика та природничі науки [12, 13].

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Віртуальні лабораторії та симуляції у професійній підготовці

Віртуальні лабораторії визначені в науковій літературі як інформаційні системи, що інтерактивно моделюють реальні технічні об'єкти і їхні властивості, використовуючи засоби комп'ютерної візуалізації [14, 15]. У професійній підготовці для транспортної галузі віртуальні лабораторії та тренажери допомагають організувати безпечне, доступне та економічно ефективне навчання, особливо в умовах, коли робота з реальним обладнанням є обмеженою або небезпечною [16, 17].

У галузевій практиці описано хмарні платформи для навчання віртуальному моделюванню транспортних засобів, що поєднують 3D-моделі, засоби віртуального відображення та модулі збору даних про несправності, дають змогу реалізувати мережеве практичне навчання для професійної освіти в автомобільній сфері. Подібні за призначенням рішення застосовано і в логістиці і транспортному менеджменті, насамперед через платформи імітаційного моделювання на кшталт AnyLogic і Simio, які дають змогу відтворювати роботу логістичних центрів, управління ресурсами в кризових ситуаціях і моделювання складських процесів.

У міжнародному контексті віртуальні лабораторії розглядають як цифрові середовища для наукового відкриття, експериментування та управління дослідницькими робочими процесами, що не обмежено лише VR/AR, а включає модульні інтерфейси до цифрових або фізичних компонентів [14, 15, 18]. Це підтверджує доцільність концепції VirtLab як платформи, що інтегрує різні типи віртуальних лабораторій, симуляцій та інструментів аналізу в єдину екосистему.

STEM-підходи для підготовки фахівців транспортної галузі

STEM-освіта, яка інтегрує природничі науки, технології, інженерію та математику, стає важливим підґрунтям для формування компетентностей майбутніх фахівців транспортної індустрії. Сучасні дослідження підкреслюють необхідність використання інтерактивних методів, симуляторів транспортних систем, віртуальних лабораторій і проєктів на основі реальних кейсів (оптимізація транспортних потоків, планування маршрутів електромобілів, розумні світлофори тощо) [12, 13].

Особливу увагу приділено міждисциплінарності, коли інженерні, IT-, екологічні та управлінські компоненти поєднані в єдиних навчальних програмах, що відповідає модульній архітектурі VirtLab. Досвід міжнародних програм, зокрема магістерської програми подвійних дипломів «Стала логістика та управління ланцюгами постачання», яку УкрДУЗТ реалізує спільно з University of the West of Scotland (UWS), демонструє, що інтеграція цифрових технологій, принципів сталого розвитку та реальних виробничих завдань є критичною для підготовки фахівців, здатних

працювати в умовах відбудови транспортної інфраструктури [19].

Гнучкість, масштабованість і користувацька орієнтованість

У світовій практиці платформи типу VirtLab розглядають як гнучкі, масштабовані та орієнтовані на користувача рішення, які допомагають технічним і нетехнічним користувачам створювати, запускати і аналізувати симуляції без необхідності програмування. Це особливо важливо для освітніх екосистем, де викладачі, методисти і здобувачі мають різний рівень технічної підготовки.

Такі платформи підтримують мультиагентні взаємодії, просторове моделювання та адаптивні сценарії, що відкриває нові можливості для дослідження командної роботи, людино-машинної взаємодії та складних транспортних систем у навчальному середовищі.

Незважаючи на численні дослідження цифровізації освіти, віртуальних лабораторій, STEM-платформ і систем управління навчанням, у науковій літературі відсутня цілісна модель цифрової освітньої екосистеми транспортного профілю, яка б одночасно забезпечувала модульну побудову різноманітних цифрових ресурсів (лабораторії, посібники, мультимедійний контент, симулятори, тести, довідники); інтеграцію теоретичної, практичної, контрольної та консультаційної складових підготовки в межах єдиної архітектури; масштабованість на рівні кафедр, факультетів і закладів освіти без зміни базової структури. Наявні рішення — LMS (Moodle, Canvas), сервіси на кшталт Google Classroom, окремі віртуальні лабораторії та STEM-платформи — вирішують локальні завдання, проте не утворюють взаємопов'язаної екосистеми практико-орієнтованої підготовки фахівців транспортної галузі. Саме на подолання цієї прогалини — через розроблення та обґрунтування концепції модульної цифрової освітньої екосистеми VirtLab — і спрямовано це дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження

Необхідність змін у системі підготовки фахівців транспортної галузі диктує необхідність цифрової трансформації основних процесів організації освітнього процесу. На сьогодні лише удосконалення окремих цифрових інструментів не відповідає сучасним вимогам, і відповідно прийняті програми так званої цифрової трансформації основних освітніх процесів, які насамперед націлені на підвищення рівня автоматизованого обслуговування здобувачів, є недостатніми. Проблема сучасних цифрових рішень полягає в тому, що з розробленням систем урахували старі підходи, за старою технологією, яка сьогодні не влаштовує ринок праці.

Метою роботи є подання авторської концепції цифрової освітньої екосистеми VirtLab, що поєднує віртуальні лабораторії, електронні посібники, мультимедійні навчальні ресурси (Smart Video, Smart

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Audio), інтерактивні модулі (симулятори, кейс-стаді, тестування), електронну бібліотеку та довідкові сервіси, а також елементи автоматизованого консультування на основі штучного інтелекту в єдиному цифровому освітньому просторі закладу вищої освіти транспортного профілю. Для виправлення ситуації заклади вищої освіти планують замінити ізольовані цифрові рішення на систему з організації освітнього процесу, яка базуватиметься на інтеграції з іншими учасниками освітнього процесу (викладачів, здобувачів, адміністраторів, роботодавців) і є перспективним напрямом розвитку цифрових освітніх платформ, особливим напрямом якої стане можливість замовляти не тільки навчальні матеріали, а й інші послуги (лабораторні роботи, тренажери, консультації, сертифікацію). Тобто заплановано перехід від системи «Розміщення матеріалів» до системи «Освітнього середовища» з автоматизацією усього «процесу організації навчання – від заявки на курс до можливого отримання сертифіката».

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

- обґрунтовано педагогічні засади моделі VirtLab щодо сучасних теорій навчання;
- обґрунтовано архітектуру та принципи побудови екосистеми;
- описано структуру її основних модулів;
- сформульовано наукову новизну запропонованого підходу;
- подано практичну реалізацію концепції на базі УкрДУЗТ;
- наведено результати апробації розробки на рівні кафедр та в контексті міжуніверситетської взаємодії;
- окреслено обмеження, ризики та перспективи розвитку екосистеми.

Отже, на сьогодні для комплексного цифрового освітнього середовища з оперативним залученням потужностей, можливостей і фахівців профільних підприємств, організацій і фізичних осіб необхідно створити певні умови, до яких насамперед необхідно віднести розроблення та запровадження технології проведення освітнього процесу із застосуванням модульної екосистеми в найкоротші терміни з урахуванням основних принципів цифрової трансформації освіти.

Основна частина дослідження

Перехід на новий рівень підготовки фахівців транспортної галузі потребує застосування нетрадиційних для освітнього процесу підходів, основною метою яких є надання комплексної послуги з навчання за мінімальних вимог до здобувача. Втілення системи «Освітнього середовища» для підготовки фахівців за схемою «від теорії до практики» потребує надання широкого діапазону додаткових послуг, які потрібні у складі комплексного навчально-методичного забезпечення. В основі нової системи запропонована система

ухвалення рішень, яка дасть змогу значно скоротити загальний час на навчання, скоротити не тільки витрати, пов'язані безпосередньо з навчальним процесом, а й витрати з надання додаткових послуг, таких як доступ до віртуальних лабораторій, підготовка до контрольних заходів, оформлення дозвільної документації, проведення консультацій, зберігання даних та ін.

Запропонована концепція цифрової освітньої екосистеми VirtLab ґрунтована не лише на технічних і архітектурних рішеннях, а й на чітко сформульованих педагогічних засадах. Її побудова відповідає сучасним теоріям навчання, зокрема конструктивізму, соціоконструктивізму, особистісно-орієнтованого та компетентнісного підходів, а також принципам змішаного (blended) і проєктного навчання в STEM-освіті.

Конструктивізм і соціоконструктивізм

У центрі педагогічної моделі VirtLab лежить ідея, що знання не передані здобувачу в готовому вигляді, а конструйовані ним у процесі активної взаємодії з навчальним середовищем [20]. Віртуальні лабораторії, симулятори та кейс-стаді, інтегровані в екосистему, створюють умови для дослідницької діяльності, експериментування та самостійного відкриття закономірностей. Здобувач не просто споживає теоретичний матеріал, а планує експеримент, взаємодіє з моделлю транспортного процесу, аналізує результати, робить висновки та корегує свої уявлення на основі зворотного зв'язку.

Соціоконструктивістський підхід реалізовано через можливість спільної роботи над кейсами, обговорення результатів лабораторних робіт, використання форумів, чатів і AI-помічника для колективного пошуку рішень [20]. Така організація навчального середовища сприяє формуванню комунікативних компетентностей, навичок командної роботи і критичного мислення, що є дуже важливим для фахівців транспортної галузі.

Компетентнісний і особистісно-орієнтований підходи

Модульна архітектура VirtLab дає змогу реалізувати компетентнісний підхід, орієнтуючись не лише на засвоєння знань, а на формування професійних компетентностей: уміння планувати експеримент, обробляти дані, моделювати технологічні процеси, ухвалювати обґрунтовані рішення [21]. Кожен модуль екосистеми (лабораторія, симулятор, кейс, тест) має чітко визначені очікувані результати навчання, що відповідають певним компетентностям професійного стандарту.

Особистісно-орієнтований підхід забезпечено багатоформатним поданням матеріалу: одна і та сама тема може бути подана як текст лекції, відеолекція, аудіолекція, кейс-стаді, симулятор, тест, комбінований модуль який включає декілька компонентів (або всі разом), це дає змогу здобувачам вибирати траєкторію навчання відповідно до їхніх індивідуальних стилів сприйняття інформації. AI-помічник додатково індивідуалізує навчання,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

надаючи підказки, пояснення та рекомендації залежно від рівня підготовки здобувача.

Активне, проблемне і проєктне навчання

Активне навчання — основний принцип STEM-освіти, за якого здобувачі залучені до самостійного оволодіння знаннями та уміннями у процесі активної розумової та практичної діяльності [22]. У VirtLab цей принцип реалізовано через інтерактивні модулі, де здобувач не пасивно споживає контент, а взаємодіє із симулятором, змінює параметри моделі, спостерігає наслідки, аналізує результати, а також через дослідницькі завдання у віртуальних лабораторіях, що потребують формулювання гіпотез, планування експерименту, збору та обробки даних.

Проблемне навчання реалізовано через кейс-стаді, що базовані на реальних проблемах транспортної галузі, — оптимізації транспортних потоків, управлінні складськими процесами, плануванні маршрутів, публічних закупівлях на транспорті тощо. Здобувачі стикаються з неповною інформацією, необхідністю аналізу нормативних документів, ухваленням рішень в умовах невизначеності, що наближає навчальний процес до реальної професійної діяльності, стимулює критичне мислення.

Проєктне навчання закладено в модуль конструктора курсових і контрольних робіт, де здобувачі послідовно проходять такі етапи: визначення проблеми → пошук інформації → ухвалення рішення → виконання розрахунків → оформлення пояснювальної записки → аналіз результатів → можливість виправлення визначених помилок → тестування → презентація результатів. AI-помічник супроводжує цю діяльність, надаючи підказки з вибору теми, формулювання мети, вибору джерел і оформлення результату.

Змішане (blended) навчання

VirtLab реалізує принципи змішаного навчання, поєднуючи асинхронну роботу з електронними посібниками, Smart Video, Smart Audio, віртуальними лабораторіями та синхронну взаємодію через відеоконференції, обговорення кейсів і спільні проєкти, описані вище. Така організація допомагає ефективно використовувати контактний час для практичних і дискусійних форм роботи, тоді як теоретичний матеріал здобувач опрацьовує самостійно в зручний для нього час.

STEM-підхід як педагогічна основа

VirtLab побудовано з урахуванням основних принципів STEM-освіти: міждисциплінарність, інтеграція природничих наук, технологій, інженерії та математики, акцент на практико-орієнтованих завданнях і проєктах. Модулі екосистеми поєднують інженерні, IT-, екологічні та управлінські компоненти, що відповідає сучасним вимогам щодо підготовки фахівців транспортної галузі.

Дослідження підтверджують, що впровадження елементів STEM-освіти в підготовку фахівців із транспортних технологій і логістики сприяє розвитку

критичних і аналітичних навичок, заохочує творчий потенціал і мотивує до вивчення математичних дисциплін [12, 13]. Саме такі ефекти закладено в архітектуру VirtLab через використання симуляторів, віртуальних лабораторій і кейсів, що потребують застосування математичних моделей, інженерного аналізу і технологічних рішень.

Дидактичні принципи побудови віртуальних лабораторій

Педагогічне обґрунтування віртуальних лабораторій у складі VirtLab спирається на загальні дидактичні теорії навчання та положення особистісно-орієнтованого підходу. Важливими дидактичними принципами є:

- інтерактивність — здобувач активно взаємодіє з навчальним середовищем, а не пасивно спостерігає;
- моделювання та візуалізація — складні технологічні процеси транспортної галузі відтворено у зручному для сприйняття вигляді;
- послідовність етапів — від визначення мети і очікуваних результатів через експериментальний етап до аналізу даних і рефлексії;
- безпека та доступність — можливість відпрацювати небезпечні або рідкісні операції без ризику для обладнання та людей необмежена ні часом, ні кількістю [16, 17].

Ці принципи забезпечують не лише технічну реалізацію віртуальних лабораторій, а і їхню педагогічну цінність як засобу формування професійних компетентностей.

Отже, педагогічне обґрунтування моделі VirtLab демонструє, що запропонована екосистема не є суто технічним рішенням, а становить цілісну дидактичну модель, яка відповідає сучасним теоріям навчання (конструктивізм, соціоконструктивізм, компетентнісний і особистісно-орієнтований підходи), реалізує принципи змішаного та проєктного навчання, критично важливі для професійної підготовки, та інтегрує STEM-підхід як основу для формування міждисциплінарних компетентностей фахівців транспортної галузі. Саме таке педагогічне підґрунтя відрізняє VirtLab від традиційних LMS і вузькоспеціалізованих тренажерів, перетворюючи його на повноцінну освітню екосистему, орієнтовану на формування професійних компетентностей, а не лише на передавання знань.

В основу концепції VirtLab покладено ідею єдиного цифрового простору, у центрі якого перебуває не окремий навчальний курс чи дисципліна, а сама екосистема як інтегроване середовище, що об'єднує різноманітні за форматом освітні ресурси навколо спільної архітектури, спільного принципу навігації та спільної бази даних. На відміну від традиційної LMS, яка організує навчання «зверху вниз» від курсу до матеріалів, VirtLab організований «від модуля». Кожен тип цифрового ресурсу (лабораторія, посібник, відео, тест, кейс, симулятор, аудіоматеріал, бібліотечна одиниця,

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

довідник, інструмент) є самостійним, універсальним модулем, який може бути прив'язаний до будь-якої дисципліни, кафедри чи факультету.

Архітектура екосистеми має радіальну, а не ієрархічну структуру (рисунок): у центрі перебуває платформа VirtLab, яка виконує функції єдиної точки входу, навігації та зберігання даних, а навколо неї розташовані функціональні модулі — віртуальні лабораторії, електронні посібники, відео-,

аудіоматеріали, кейс-стаді, тести, симулятори, електронна бібліотека, довідники, інструменти конструювання навчальних завдань. Така побудова забезпечує логіку «єдиного входу — множинного виходу»: здобувач і викладач звертаються до одного порталу, а отримують доступ до всього спектра освітніх ресурсів незалежно від факультету чи кафедри.

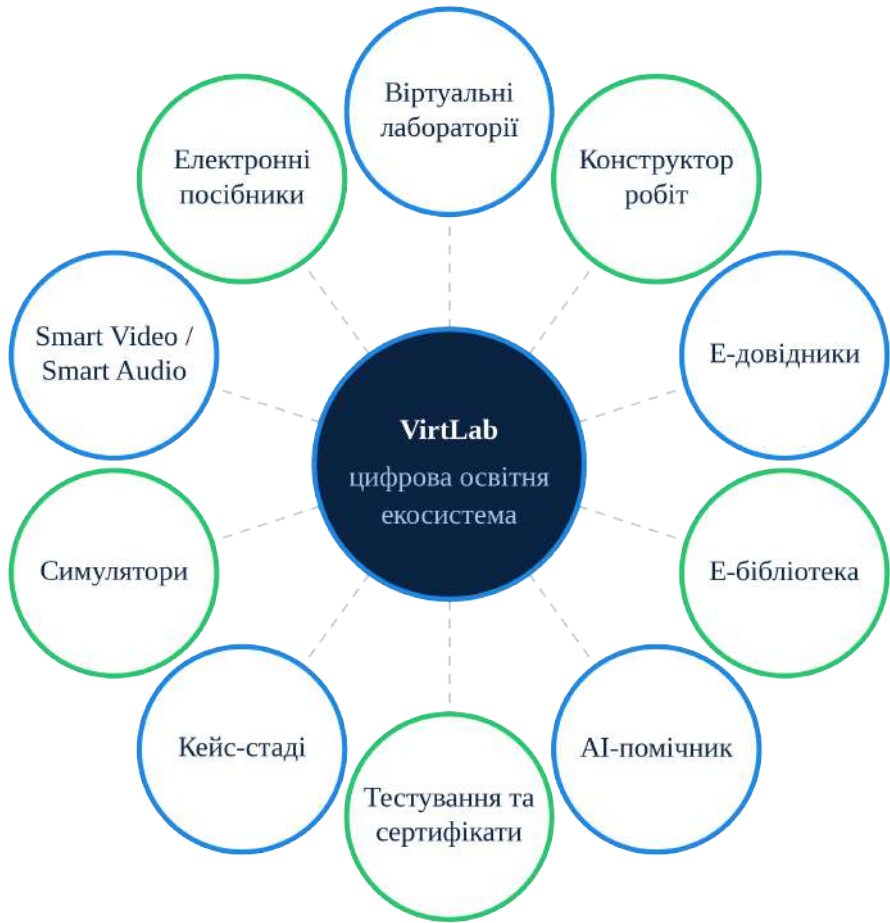


Рис. Радіальна архітектура цифрової освітньої екосистеми VirtLab

Структура цифрової екосистеми VirtLab
Функціонально екосистема VirtLab складається з модулів, узагальнену характеристику яких наведено в табл. 1.

Структура модулів цифрової освітньої екосистеми
VirtLab

Модуль	Призначення
Віртуальні лабораторії	Виконання практичних і лабораторних робіт в інтерактивному вебформаті без прив'язки до фізичного обладнання
Електронні посібники	Самостійне вивчення теоретичного матеріалу за уніфікованим цифровим шаблоном

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Симулятори	Відпрацювання практичних навичок і виробничих операцій у безпечному цифровому середовищі
Smart Video	Інтерактивне відео з вбудованими запитаннями, підказками та контрольними точками
Smart Audio	Аудіонавчання для сприйняття матеріалу в асинхронному та мобільному форматах
Кейс-стаді	Аналіз реальних виробничих ситуацій для розвитку прикладного мислення
Тести і сертифікати	Багаторівневий контроль знань із таймером і автоматичним формуванням звіту в режимах навчання/контроль знань
AI-помічник	Автоматизоване консультування, підказки та супровід заповнення документів
Електронна бібліотека	Відкритий доступ до підручників, посібників і навчальних матеріалів
Е-довідники	Інтерактивні довідкові бази з пошуком, фільтрацією та порівнянням даних
Конструктор курсових і контрольних робіт	Покрокове формування структури та індивідуальних завдань самостійної роботи
Доступ до нормативно-правових актів	Пряме посилання на чинні нормативні документи за темою підготовки

Наукова новизна запропонованого дослідження полягає в такому:

- запропоновано авторську модель модульної цифрової освітньої екосистеми транспортного профілю, яка об'єднує лабораторний практикум, електронний посібник, мультимедійний і контрольний оцінювальний контент у єдиній архітектурі з радіальною структурою навігації;

- обґрунтовано інтеграцію віртуальних лабораторій і електронних посібників у межах спільного цифрового шаблону, що усуває розрив між теоретичною та практичною складовими підготовки фахівця;

- запропоновано єдиний принцип побудови віртуальних лабораторій різних кафедр і факультетів, що забезпечує їхню взаємну сумісність і можливість повторного використання цифрових компонентів;

- розроблено універсальний шаблон електронного навчального модуля, придатний до масштабування на нові дисципліни без зміни базової архітектури;

- сформульовано модель багатоформатного навчання, за якою одна і та сама навчальна тема одночасно подана у форматах тексту, відео, аудіо, симулятора і тесту, що дає змогу враховувати різні стилі сприйняття інформації здобувачами;

- обґрунтовано радіальну, а не ієрархічну архітектуру цифрового освітнього середовища: на відміну від традиційної для LMS структури «заклад → факультет → курс → тиждень → ресурс», у VirtLab здобувач звертається до єдиної точки входу (порталу)

і вибирає модуль за темою чи навичкою, а не за належністю до конкретного курсу;

- запропоновано відкрити, а не закрити модель екосистеми: архітектура VirtLab допускає підключення сторонніх LMS, бібліотечних систем, відеоплатформ і тренажерів як модулів, що перетворює VirtLab з окремого програмного продукту на платформу інтеграції різномірних освітніх ресурсів.

Запропонована концепція реалізована у вигляді діючої цифрової освітньої екосистеми «ВіртЛаб УкрДУЗТ», доступної за адресою <https://virtlab.kart.edu.ua/>. Саме ця платформа є експериментальною базою для апробації архітектурних рішень, модульного підходу і цифрових освітніх сервісів, описаних у статті.

Концепція реалізована не лише на теоретичному рівні, а і у вигляді діючого цифрового продукту. У межах проекту VirtLab УкрДУЗТ розроблено та впроваджено:

- головний портал ВіртЛаб УкрДУЗТ — єдину точку входу до освітніх напрямів, екосистеми модулів, розділів партнерства та центру проєктів;

- демонстраційний цифровий освітній шоурум DemoLab, який дає в одному місці всі формати подання навчального матеріалу — PDF-підручники, інтерактивні е-лекції, відеолекції, аудіолекції, смарт-відео, комбіновані лекції, віртуальні AI-асистенти і кейс-стаді — на прикладі однієї теми, що унаочнює принцип «одна тема — кілька способів її пізнати»;

- серію віртуальних лабораторій і електронних посібників для кафедр факультету

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

управління процесами перевезень і механіко-енергетичного факультету, побудованих за єдиним цифровим шаблоном;

– окремі STEM-модулі та інтерактивні довідники, інтегровані в загальну структуру порталу;

– механізми подання заявок на ініціювання нових лабораторій і симуляторів і центр моніторингу реалізованих і поточних проєктів екосистеми.

Принцип єдиного цифрового шаблону вже підтверджено на рівні конкретних навчальних дисциплін кількох кафедр і факультетів університету: за єдиною модульною логікою розроблено повноцінні предметні цифрові платформи, кожна з яких охоплює

практично весь цикл підготовки — від лекційного матеріалу до самостійної та курсової роботи (табл. 2).

Приклади предметних цифрових платформ, реалізованих у складі екосистеми VirtLab

Навчальна дисципліна	Реалізовані модулі та їх обсяг
Публічні закупівлі на транспорті	15 інтерактивних лекцій; понад 30 кейс-стаді; понад 30 смарт-відео; понад 30 аудіоматеріалів; вісім інтерактивних практичних робіт; вісім симуляторів; інтерактивна бібліотека; аналітично-освітній блок «Новини»; контрольна робота; тести; електронний посібник; понад 20 методичних вказівок
Організація виконання вантажних операцій	Вісім інтерактивних практичних робіт; симулятор; інтерактивний блок конструювання курсової роботи з використанням AI-помічника; інтерактивна бібліотека; понад 30 методичних вказівок; вісім інтерактивних довідників; трирівневий інтерактивний тестовий модуль
Системи енергетичного менеджменту	15 інтерактивних лекцій; чотири симулятори; інтерактивний блок конструювання курсової роботи з використанням AI-помічника; тести; 15 інтерактивних практичних робіт; понад 10 методичних вказівок
Дисципліни кафедри «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент»	понад 10 лабораторних робіт; два електронні інтерактивні довідники

Обмеження та ризики впровадження

Об'єктивне оцінювання запропонованої концепції потребує чіткого окреслення її поточних обмежень і ризиків, які визначають напрями подальшої роботи над проєктом:

– обмежена вибірка апробації: на сьогодні екосистема практично впроваджена в межах кількох кафедр двох факультетів УкрДУЗТ, тому висновки про її ефективність поки не можна екстраполювати на весь заклад освіти чи на інші університети без додаткової перевірки;

– відсутність тривалого моніторингу результатів навчання: наявні дані апробації відображають позитивне сприйняття розробки на рівні кафедр та окремих зустрічей з іншими закладами, проте кількісні показники впливу на успішність і компетентності здобувачів протягом кількох навчальних циклів ще не зібрано;

– технічні обмеження: повноцінна робота з інтерактивними лабораторіями, симуляторами та мультимедійним контентом потребує стабільного доступу до інтернету і достатньо потужних пристроїв, що не завжди гарантовано в умовах воєнного стану,

перебоїв з електропостачанням чи обмеженої матеріально-технічної бази здобувачів;

– потреба підвищити цифрову компетентність викладачів: ефективне наповнення і супровід модулів екосистеми (створення електронних посібників, Smart Video, кейс-стаді, налаштування тестів) потребує від науково-педагогічних працівників додаткових цифрових навичок і часу для системного методичного супроводу та підвищення кваліфікації;

– ризики, пов'язані з розвитком AI-складової: розширення функціоналу AI-помічника потребує виваженого підходу для достовірності консультацій, академічної доброчесності та захисту персональних даних здобувачів.

Ці обмеження не заперечують практичну цінність концепції VirtLab, проте окреслюють реалістичні межі поточних висновків і мають бути враховані для планування подальшого масштабування екосистеми на нові кафедри, факультети і заклади освіти.

Перспективи розвитку

Подальший розвиток екосистеми VirtLab передбачений за такими напрямками:

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

– розширення функціоналу AI-помічника до рівня повноцінного інтелектуального тьютора, здатного індивідуалізувати траєкторію навчання здобувача;

– впровадження технологій віртуальної (VR) і доповненої (AR) реальності для окремих лабораторних і тренажерних модулів, що потребують просторової візуалізації виробничих процесів;

– формування концепції цифрового кампусу як логічного розширення екосистеми VirtLab на рівень усього закладу освіти;

– адаптація архітектури VirtLab для використання іншими закладами вищої освіти транспортного і технічного профілю;

– створення міжуніверситетської мережі віртуальних лабораторій, що дасть змогу спільно використовувати цифрові освітні ресурси кількома закладами освіти в межах національної та міжнародної співпраці.

Ці напрями визначають дослідницьку і проектну перспективу подальших публікацій, а також формують підґрунтя для участі проекту VirtLab у національних і міжнародних грантових програмах, орієнтованих на цифровізацію освіти і розвиток інфраструктури університетів.

Авторська концепція розвитку VirtLab. В основу подальшого розвитку екосистеми VirtLab покладено систему принципів, сформульованих авторами як концептуальна основа проекту:

1.Принцип модульності — кожен освітній ресурс є самостійним, незалежним модулем, який може бути доданий, замінений або оновлений без порушення роботи всієї екосистеми.

2.Принцип багатоформатного навчання — одна навчальна тема одночасно подана у форматах тексту, відео, аудіо, симулятора і тесту.

3.Принцип інтерактивності — здобувач є активним учасником освітнього процесу, а не пасивним споживачем контенту.

4.Принцип практикоорієнтованості — пріоритет надано модулям, що відтворюють реальні виробничі ситуації та операції.

5.Принцип масштабованості — додавання нових кафедр, факультетів чи закладів освіти не потребує перегляду базової архітектури.

6.Принцип міждисциплінарності — модулі екосистеми придатні до використання в межах різних спеціальностей і галузей знань.

7.Принцип відкритої інтеграції — архітектура VirtLab допускає підключення сторонніх сервісів, зокрема LMS, бібліотечних систем і засобів відеозв'язку.

8.Принцип повторного використання цифрових ресурсів — розроблений модуль (шаблон посібника, лабораторії чи тесту) може бути повторно застосований для іншої дисципліни чи кафедри.

Саме ці принципи, а не окремі технічні рішення, становлять концептуальне ядро проекту і відрізняють VirtLab від опису конкретного

програмного продукту: вони формують модель, яка може бути відтворена та адаптована іншими закладами освіти незалежно від їхньої галузевої спеціалізації.

Висновки

У статті подано та обґрунтовано авторську концепцію цифрової освітньої екосистеми VirtLab, розроблену на кафедрі управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Створено нову модель організації цифрового навчання, яка, на відміну від традиційних систем управління навчанням і поодиноких віртуальних лабораторій і STEM-платформ, поєднує практичну, теоретичну, контрольну-оцінювальну та консультативну складові підготовки фахівця в межах єдиної модульної архітектури.

Підтверджено практичну реалізацію концепції: розроблено головний портал VirtLab УкрДУЗТ, демонстраційний шоурум DemoLab, серію віртуальних лабораторій та електронних посібників, що охоплюють кілька кафедр і факультетів університету. Розробку схвалено на засіданні кафедри та рекомендовано для використання в освітньому процесі, а надання концепції іншим закладам вищої освіти засвідчило зацікавленість у подальшій співпраці.

Показано перспективи масштабування екосистеми в напрямках штучного інтелекту, віртуальної та доповненої реальності, цифрового кампусу та міжуніверситетської мережі лабораторій. Викладена концепція вводить у науковий обіг поняття «цифрова освітня екосистема VirtLab» як самостійну модель організації цифрового навчання і слугуватиме першоджерелом для подальших публікацій, присвячених окремим лабораторіям, електронним посібникам, STEM-модулям і функціям штучного інтелекту в межах цього проекту, а також основою для підготовки грантових заявок, спрямованих на розвиток цифрової інфраструктури університету.

Внесок авторів

Шевченко В. І. — ідея концепції VirtLab, розроблення архітектури цифрової освітньої екосистеми, написання основної частини тексту статті.

Лаврухін О. В. — наукове консультування, методологічне обґрунтування дослідження, редагування тексту, узагальнення результатів.

Список використаних джерел

1. Дущенко, О. С. (2021). Сучасний стан цифрової трансформації освіти. *Фізико-математична*

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

освіта, 2(28), 40–45. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2021-028-2-007>

2. Verina, N., & Titko, J. (2019). Digital transformation: Conceptual framework. In *Contemporary Issues in Business, Management and Economics Engineering: Proceedings of the 6th International Scientific Conference* (pp. 719–727). VGTU Press. <https://doi.org/10.3846/cibmee.2019.073>

3. Сафонов, Ю. М., & Коротун, О. П. (2024). Цифровізація освіти в Україні: технології та методики навчання. *Трансформаційна економіка*, (2), 89–94. <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-7-15>

4. Пріма, Р., Гончарук, О., Пріма, Д., & Рославець, Р. (2023). Цифровізація освіти — тренд, стратегія й виклик часу. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*, (3), 183–191

5. Bousboula, T., El Fadli, F., & Khaldi, M. (2025). Comparative study between Moodle, Canvas and Google Classroom. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 9(4), 581–593. DOI: 10.47772/IJRISS.2025.90300219

6. Павлиш, Т., Басараб, В., Терещенко, О., & Рогів, М. (2023). Цифровізація освітнього процесу в закладах вищої освіти в умовах воєнного стану. *Освітні обрії*, (1), 106–109.

7. Suleimankadieva, A., Petrov, M., & Kuznetsov, A. (2021). Digital educational ecosystem as a tool for the intellectual capital development. *SHS Web of Conferences*, 116, Article 00060. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202111600060>

8. Zhao, Y., & Yang, Z. (2024). Research on collaborative innovation optimization strategies for digitally enabled higher education ecosystems. *PLoS ONE*, 19(4), Article e0302285. DOI: [10.1371/journal.pone.0302285](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302285)

9. Bobro, N. (2025). Modeling the educational and economic ecosystem of the digital university in the context of intellectual capital formation. *Economic Synergy*, (2), 6–18. DOI: 10.53920/ES-2025-2-1

10. Otto, D., Scharnberg, G., Kerres, M., & Zawacki-Richter, O. (2023). Introduction: Distributed learning ecosystems. Concepts, resources, and repositories. In D. Otto, G. Scharnberg, M. Kerres, & O. Zawacki-Richter (Eds.), *Distributed Learning Ecosystems: Concepts, Resources, and Repositories* (pp. 1–11). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-38703-7_1

11. Український державний університет залізничного транспорту. (б. д.). *Портал дистанційного навчання*. <https://kart.edu.ua/osvita/portal-do>

12. Kefalis, C., Skordoulis, C., & Drigas, A. (2025). Digital simulations in STEM education: Insights from recent empirical studies, a systematic review. *Encyclopedia*, 5(1), Article 10. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010010>

13. Khalid, I. L., Abdullah, M. N. S., & Mohd Fadzil, H. (2024). A systematic review: Digital learning in STEM education. *Journal of Advanced Research in*

Applied Sciences and Engineering Technology, 51(1), 98–115. DOI: 10.37934/araset.51.1.98115

14. Solvang, L., & Haglund, J. (2020). Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: A systematic review 2009–2019. *Journal of Science Education and Technology*, 29(6), 749–762. DOI: 10.1007/s10956-020-09866-0

15. Wahyudi, M. N. A., & Sutrisno, J. (2024). Understanding virtual laboratories in engineering education: A systematic literature review. *International Journal of Pedagogy and Teacher Education*, 7(2). DOI: 10.20961/ijpte.v7i2.85271

16. de Jong, T., Keller, M. C., Tortola, J. J., & Pedaste, M. (2013). Conceptual understanding of electrical circuits in secondary vocational engineering education: Combining traditional instruction with inquiry learning in a virtual lab. *Journal of Engineering Education*, 102(4), 575–593. DOI: 10.1002/jee.20022

17. Zhu, H., Yang, Z., Xiong, Y., Wang, Y., & Kang, L. (2018). Virtual emulation laboratories for teaching offshore oil and gas engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5), 1603–1613. DOI: 10.1002/cae.21977

18. de la Torre, L., Heradio, R., Jara, C. A., Sanchez, J., Dormido, S., Torres, F., & Candelas, F. A. (2013). Providing collaborative support to virtual and remote laboratories. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 6(4), 312–323. DOI: 10.1109/TLT.2013.20

19. Студенти УкрДУЗТу можуть отримати диплом University of the West of Scotland. (2024, 18 березня). *Railinsider*. <https://www.railinsider.com.ua/studenty-ukrduztu-mozhut-otrymaty-dyplom-university-of-the-west-of-scotland/>

20. Ahmadvand, S., & Khoshchreh, M. (2023). Theory and practice: Implications of social constructivism in education. *International Journal of Humanities and Social Development Research*, 7(2), 19–30. <https://doi.org/10.30546/2523-4331.2023.7.2.19>

21. Pérez Zúñiga, R., Martínez García, M., & Oliva Ibarra, F. E. (2025). Employability and its relationship with the competency-based approach, teaching methodologies, and assessment in higher education: A systematic review. *Frontiers in Education*, 10, Article 1703144. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1703144>

22. Roig, P. J., Alcaraz, S., Gilly, K., Bernad, C., & Juiz, C. (2026). Combining active learning methodologies in a STEM-related course: A case study. *Education Sciences*, 16(5), Article 740. <https://doi.org/10.3390/educsci16050740>

References

1. Dushchenko, O. S. (2021). Suchasnyi stan tsyfrovoy transformatsii osvity [The current state of digital transformation of education]. *Fizyko-Matematychna Osvita*, 2(28), 40–45. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2021-028-2-007>

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2. Verina, N., & Titko, J. (2019). Digital transformation: Conceptual framework. In *Contemporary Issues in Business, Management and Economics Engineering: Proceedings of the 6th International Scientific Conference* (pp. 719–727). VGTU Press. <https://doi.org/10.3846/cibmee.2019.073>.
3. Safonov, Yu. M., & Korotun, O. P. (2024). Tsyfrovizatsiia osvity v Ukraini: tekhnolohii ta metodyky navchannia [Digitalization of education in Ukraine: Technologies and teaching methods]. *Transformatsiina Ekonomika*, (2), 89–94. <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-7-15>.
4. Prima, R., Honcharuk, O., Prima, D., & Roslavets, R. (2023). Tsyfrovizatsiia osvity — trend, stratehiia i vyklyk chasu [Digitalization of education — Trend, strategy and challenge of time]. *Pedahohichni Nauky: Teoriia, Istoriia, Innovatsiini Tekhnolohii*, (3), 183–191.
5. Bousboula, T., El Fadli, F., & Khaldi, M. (2025). Comparative study between Moodle, Canvas and Google Classroom. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 9(4), 581–593. DOI: 10.47772/IJRISS.2025.90300219.
6. Pavlysh, T., Basarab, V., Tereshchenko, O., & Rohiv, M. (2023). Tsyfrovizatsiia osvitnoho protsesu v zakladakh vyshchoi osvity v umovakh voiennoho stanu [Digitalization of the educational process in higher education institutions under martial law]. *Osvitni Obrii*, (1), 106–109.
7. Suleimankadieva, A., Petrov, M., & Kuznetsov, A. (2021). Digital educational ecosystem as a tool for the intellectual capital development. *SHS Web of Conferences*, 116, Article 00060. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202111600060>.
8. Zhao, Y., & Yang, Z. (2024). Research on collaborative innovation optimization strategies for digitally enabled higher education ecosystems. *PLoS ONE*, 19(4), Article e0302285. DOI: [10.1371/journal.pone.0302285](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302285)
9. Bobro, N. (2025). Modeling the educational and economic ecosystem of the digital university in the context of intellectual capital formation. *Economic Synergy*, (2), 6–18. DOI: 10.53920/ES-2025-2-1
10. Otto, D., Scharnberg, G., Kerres, M., & Zawacki-Richter, O. (2023). Introduction: Distributed learning ecosystems. Concepts, resources, and repositories. In D. Otto, G. Scharnberg, M. Kerres, & O. Zawacki-Richter (Eds.), *Distributed Learning Ecosystems: Concepts, Resources, and Repositories* (pp. 1–11). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-38703-7_1.
11. Ukrainian State University of Railway Transport. (n.d.). *Portal dystantsiinoho navchannia* [Distance learning portal]. <https://kart.edu.ua/osvita/portal-do>.
12. Kefalis, C., Skordoulis, C., & Drigas, A. (2025). Digital simulations in STEM education: Insights from recent empirical studies, a systematic review. *Encyclopedia*, 5(1), Article 10. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010010>.
13. Khalid, I. L., Abdullah, M. N. S., & Mohd Fadzil, H. (2024). A systematic review: Digital learning in STEM education. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 51(1), 98–115. DOI: 10.37934/araset.51.1.98115
14. Solvang, L., & Haglund, J. (2020). Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: A systematic review 2009–2019. *Journal of Science Education and Technology*, 29(6), 749–762. DOI: 10.1007/s10956-020-09866-0
15. Wahyudi, M. N. A., & Sutrisno, J. (2024). Understanding virtual laboratories in engineering education: A systematic literature review. *International Journal of Pedagogy and Teacher Education*, 7(2). DOI: 10.20961/ijpte.v7i2.85271
16. de Jong, T., Keller, M. C., Tortola, J. J., & Pedaste, M. (2013). Conceptual understanding of electrical circuits in secondary vocational engineering education: Combining traditional instruction with inquiry learning in a virtual lab. *Journal of Engineering Education*, 102(4), 575–593. DOI: 10.1002/jee.20022
17. Zhu, H., Yang, Z., Xiong, Y., Wang, Y., & Kang, L. (2018). Virtual emulation laboratories for teaching offshore oil and gas engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5), 1603–1613. DOI: 10.1002/cae.21977
18. de la Torre, L., Heradio, R., Jara, C. A., Sanchez, J., Dormido, S., Torres, F., & Candelas, F. A. (2013). Providing collaborative support to virtual and remote laboratories. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 6(4), 312–323. DOI: 10.1109/TLT.2013.20
19. Studenty UkrDUZTu mozhut otrymaty dyplom University of the West of Scotland [Students of UkrSURT can get a degree from the University of the West of Scotland]. (2024, March 18). *Rail.insider*. <https://www.railinsider.com.ua/studenty-ukrdutztu-mozhut-otrymaty-dyplom-university-of-the-west-of-scotland/>
20. Ahmadvand, S., & Khoshchreh, M. (2023). Theory and practice: Implications of social social constructivism in education. *International Journal of Humanities and Social Development Research*, 7(2), 19–30. <https://doi.org/10.30546/2523-4331.2023.7.2.19>
21. Pérez Zúñiga, R., Martínez García, M., & Oliva Ibarra, F. E. (2025). Employability and its relationship with the competency-based approach, teaching methodologies, and assessment in higher education: A systematic review. *Frontiers in Education*, 10, Article 1703144. DOI: <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1703144>
22. Roig, P. J., Alcaraz, S., Gilly, K., Bernad, C., & Juiz, C. (2026). Combining active learning methodologies in a STEM-related course: A case study. *Education Sciences*, 16(5), Article 740. <https://doi.org/10.3390/educsci16050740>

Shevchenko V., Lavrukhin O. VirtLab: A Modular Digital Educational Ecosystem Concept for Professional and STEM Training of Transport Industry Specialists

Abstract. The rapid digitalization of higher education intensifies the need for a unified digital educational environment capable of combining practical training, self-directed learning, and knowledge assessment within a single space. Existing solutions — learning management systems (Moodle, Canvas), services such as Google Classroom, and individual virtual laboratories and STEM platforms — address local tasks but do not form a coherent, interconnected ecosystem for practice-oriented professional training. The aim of the study is to provide a pedagogical rationale for, and to present the architecture, design principles, and practical implementation of, VirtLab as a modular environment that integrates virtual laboratories, e-manuals, multimedia resources (Smart Video, Smart Audio), and interactive educational resources (simulators, case studies, testing), together with an electronic library, reference modules, and elements of AI-based automated consultation. The pedagogical foundation of the model draws on constructivism, socio-constructivism, competency-based and learner-centered approaches, as well as the principles of active, problem-based, project-based, and blended learning within STEM education. The scientific novelty lies in the following: an original model of a unified modular principle for structuring heterogeneous digital educational resources within a single ecosystem is proposed, together with a universal template for an e-learning module that allows the same educational content to be presented in multiple formats. The practical implementation is represented by the main VirtLab UkrDUZT portal (virtlab.kart.edu.ua), the DemoLab demonstration educational showroom, and a series of virtual laboratories and e-manuals covering several departments and faculties of the university. The development has been reviewed and approved at a department meeting and recommended for use in the educational process; the concept has been presented to other higher education institutions, which expressed interest in further cooperation. The limitations of the current approbation are outlined (a limited sample of departments, the absence of long-term monitoring of learning outcomes), along with prospects for the ecosystem's development in the areas of artificial intelligence, virtual and augmented reality, a digital campus, and an inter-university network of laboratories,

which forms the basis for further scholarly publications and grant initiatives.

Keywords: digital education, virtual laboratory, STEM, interactive learning, digital educational ecosystem, e-manual, modular learning, transport education, digital transformation, competency-based approach, artificial intelligence in education.

Шевченко Віталій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: +38 (050) 582-24-21. E-mail: 50801@ukr.net; ORCID iD: 0000-0002-0873-3802.

Лаврухін Олександр Валерійович, докт. техн. наук, професор кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. Тел.: +38 (097) 428-27-74. E-mail: tilavalval@gmail.com; ORCID iD: [0000-0003-1302-4960](https://orcid.org/0000-0003-1302-4960).

Shevchenko Vitaly, Ph. D., associate Professor of the Department of freight and commercial work of the Ukrainian state University of Railway transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. +38 (057) 730-10-85. E-mail: 50801@ukr.net; ORCID iD: 0000-0002-0873-3802.

Lavrukhin Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of freight and commercial work of the Ukrainian state University of Railway transport, Kharkiv, Ukraine Tel. +38 (097) 428-27-74. E-mail: tilavalval@gmail.com; ORCID iD: [0000-0003-1302-4960](https://orcid.org/0000-0003-1302-4960).

Стаття надійшла 19.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 05.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

TROIANIVSKYI V. I., graduate student

(National Transport University)

System model of intelligent power supply management of transport infrastructure

Abstract. *The article considers the problem of formalizing the structure of intelligent transport infrastructure power supply management systems at the design stage. It is shown that the traditional approach to designing transport power supply systems, based on deterministic calculations of expected loads for a fixed set of operational scenarios, is methodologically limited, since it does not take into account the dynamic nature of the interaction of infrastructure elements, the probabilistic nature of load and generation fluctuations, as well as the need for operational adaptation of management decisions to changing operating conditions. The feasibility of using a systems approach to build a formalized model of an intelligent system that integrates the sensory, analytical, management and executive levels is substantiated. A generalized model of the system is developed in the form of a tuple that describes input parameters, internal states, output control decisions and transition and decision-making functions. A multi-criteria objective function for optimizing design solutions is proposed, which reconciles the economic, reliability and environmental components, as well as the reliability index of the system with the redundancy of power supply sources. The practical value of the proposed model for projects to restore damaged transport infrastructure in the conditions of post-war development is shown, in particular for substantiating decisions on capacity redundancy and integration of distributed and renewable energy sources. The limitations of the model associated with the quality of input data and the need to calibrate the weight coefficients of the objective function to specific project conditions are outlined, and the prospects for further research on automated tuning of model parameters based on accumulated operational data are also identified. The proposed approach can be used as a methodological basis for designing intelligent transport infrastructure power supply systems under conditions of increased uncertainty.*

Keywords: *intelligent system, transport power supply, system model, design, decision support, multi-criteria optimization, post-war recovery.*

Problem statement.

Modern transport infrastructure is increasingly dependent on reliable and efficient power supply, which includes traction and transformer substations, contact network, distributed generation facilities, energy storage systems and charging infrastructure for electric transport. The complexity of such systems increases proportionally to the number of interconnected elements, the heterogeneity of load regimes and requirements for uninterrupted supply, which is especially relevant in conditions of damage or partial destruction of energy and transport infrastructure facilities.

The traditional methodology for designing transport power supply systems is based mainly on deterministic calculations of expected loads for a fixed set of operational scenarios. This approach is methodologically limited, as it does not take into account the dynamic nature of the interaction of system elements, the probabilistic nature of load and generation fluctuations, as well as the need for operational adaptation of management decisions to changing operating

conditions. The result is understated flexibility of design decisions, insufficient system resilience to emergency situations, and limited possibilities for integrating renewable energy sources. The key difficulty lies in the lack of a formalized system model that would combine the technical, informational, management, and environmental components of an intelligent power supply system into a single, consistent description suitable for use at the design stage.

The problem of formalizing the system description becomes particularly acute in the context of armed aggression against Ukraine, when energy infrastructure facilities that supply transport systems are subjected to targeted and repeated damage. Unlike planned equipment decommissioning, combat damage is characterized by unpredictability of the moment of occurrence, spatial correlation (simultaneous damage to several facilities within one energy zone) and cascading impact on adjacent network elements, including transport infrastructure powered by damaged substations. Under such conditions, deterministic load calculation, calculated for peacetime operation, loses its practical applicability, since it does not provide mechanisms for operational load redistribution

© TROIANIVSKYI V. I., 2026

between the surviving sources and backup power supply channels. This increases the need for a system management model that is capable not only of formalizing the regular mode of operation, but also of ensuring the adaptation of control decisions to the conditions of partial or complete loss of individual infrastructure elements.

Analysis of recent research and publications.

The issue of applying a systems approach to the design of technical facilities, as well as the development of intelligent transport power supply management systems, has been considered in the works of domestic and foreign researchers in the fields of systems theory [1], electric power engineering, and the concept of intelligent power supply networks (smart grid) [4]. At the same time, the issue of a formalized system description of an intelligent power supply management system at the design stage of transport infrastructure, in particular in the context of post-war restoration of damaged facilities, remains insufficiently developed and requires further research.

Modern research demonstrates the rapid growth of interest in intelligent energy management systems and their role in ensuring the resilience of critical infrastructure. Thus, in [6], the integration of an intelligent energy management system with Internet of Things and cloud computing technologies to improve the efficiency of demand management in smart grid networks is considered, which confirms the relevance of the multi-level architecture of data collection and processing, which is embedded in the proposed model. In [7], the role of artificial intelligence and machine learning in increasing the resilience of energy systems to extreme external influences is substantiated, which is consistent with the need to take into account the probabilistic nature of damage when designing transport power supply systems. Works [8] and [9] directly address the context of post-war reconstruction of Ukraine: the first proposes an approach to the reconstruction of Ukrainian cities and management systems on the basis of sustainable development, the second, with the participation of Ukrainian researchers, substantiates a model for the restoration of Ukraine's energy supply on the basis of safety, economic feasibility and decarbonization. At the same time, the analysis of modern research shows that existing scientific approaches are mainly focused on individual aspects of intelligent power system management (load forecasting, optimization of operating modes, application of Smart Grid technologies or artificial intelligence) and do not provide their integration into a single formalized model suitable for substantiating design decisions regarding transport infrastructure power supply systems. Unlike known approaches, this study proposes a generalized system model that combines sensory, analytical, managerial and executive levels in a single mathematically formalized description, and also integrates a multi-criteria mechanism for supporting design decision-making taking into account economic, reliability

and environmental criteria in conditions of uncertainty and post-war restoration of transport infrastructure.

In the railway sector, reliability and safety requirements for critical infrastructure systems are commonly structured according to the RAMS framework defined in EN 50126 [10]. The standard establishes principles for specifying, assessing and demonstrating reliability, availability, maintainability and safety throughout the system life cycle. The proposed intelligent power supply management model is consistent with the RAMS approach because it incorporates reliability assessment, redundancy analysis and risk-oriented decision-making at the design stage.

Risk-oriented approaches are also actively applied in railway infrastructure management. In particular, the methodology proposed by Trofimov et al. [11] for railway signaling systems is based on the assessment of operational risks and the evaluation of technical system performance under uncertainty. The results confirm the effectiveness of integrating reliability indicators and risk assessment procedures into decision-support mechanisms for transport infrastructure management.

Highlighting previously unresolved parts of the general problem. *The analysis of the reviewed sources shows that, despite significant achievements in the field of integration of intelligent energy management with Internet of Things and cloud computing technologies [6], the use of artificial intelligence and machine learning to increase the resilience of power systems to extreme impacts [7], as well as models of post-war restoration of Ukraine's energy and transport infrastructure [8, 9], researchers have not paid attention to a number of interrelated issues that directly relate to the design stage of transport power supply systems.*

Firstly, there is no formalized generalized system model that would combine the sensory, analytical, managerial and executive levels of power supply management of transport infrastructure in a single description suitable for use by the designer at the design stage, and not only at the stage of operational dispatching of an already functioning network, which is mainly the subject of works [6, 7]. Secondly, a multi-criteria objective function has not been developed that would simultaneously coordinate the economic, reliability and environmental components of the design solution for the conditions of power supply source redundancy of transport infrastructure damaged as a result of hostilities. Thirdly, there is no formalized reliability indicator of the system with source redundancy, suitable for comparing alternative design options at the decision-making stage, and not only for a posteriori assessment of the reliability of the already implemented system. Fourthly, there are models of post-war restoration of the energy sector of Ukraine [8, 9] consider mainly macro-level aspects of reconstruction – investment priorities, decarbonization, sustainable urban development – and do not detail the

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

micro-level methodology for formalizing management decisions for a particular transport infrastructure facility.

Thus, the analysis of scientific sources has shown the absence of a comprehensive methodological approach that would ensure the formalization of the process of designing intelligent power supply systems for transport infrastructure while simultaneously taking into account technical, informational, economic, reliability and environmental factors. It is the need to eliminate the specified scientific and methodological gap that led to the development of a generalized system model, which forms the basis of the conducted research.

The purpose of the research is to develop a scientifically based generalized system model of an intelligent transport infrastructure power supply management system, suitable for supporting design decision-making under conditions of uncertainty, as well as to form a multi-criteria mechanism for selecting the optimal system configuration taking into account economic, reliability, and environmental criteria.

To achieve the goal, the following tasks were solved in the work:

1) to substantiate the methodological limitations of the traditional deterministic approach to calculating the loads of power supply systems of transport infrastructure;

2) to develop a generalized system model of an intelligent power supply management system in the form of a tuple $S = \langle X, Z, Y, F, \Phi \rangle$, which describes the four-level architecture of the system;

3) to detail the functional content of the sensor, analytical, management and executive levels of the system, in particular the methods of data collection and analysis and algorithmization of the decision-making function Φ ;

4) to propose a multi-criteria objective function for optimizing design solutions and an indicator of the reliability of the system with redundant power supply sources;

5) to illustrate the application of the developed model on a conditional example of comparing design options in the conditions of post-war restoration of damaged transport infrastructure.

Presentation of the main material of the study.

The transport infrastructure power supply system is a complex object that combines elements that are heterogeneous in purpose and nature of operation: traction and transformer substations, contact network, cable and overhead lines, distributed generation facilities (solar and wind installations), energy storage systems, as well as charging infrastructure for electric transport.

Each of these elements is characterized by its own operating mode and its own sensitivity to external influences, which determines the fundamentally heterogeneous structure of the system as a whole.

The traditional design approach involves determining the design load of the power supply system by summing the nominal loads of individual consumers, taking into account the demand coefficient:

$$P_{load} = k_d \cdot \sum P_{rated, i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

where k_d – demand coefficient;

$P_{rated, i}$ – rated power of the i -th consumer;

P_{load} – design load of the system.

This approach is simple to apply, but does not take into account the stochastic nature of the load over time, the mutual influence of system elements, and the possibility of abnormal conditions (line damage, sudden load increases, fluctuations in renewable generation). The calculated value of P_{load} , obtained by formula (1), is actually a deterministic estimate for a fixed scenario and does not ensure the adaptability of the design solution to changing operating conditions.

Overcoming this limitation requires a transition from a deterministic model of load calculation to a system control model based on the principles of cybernetics and systems theory [1]. The proposed model of an intelligent system for managing the power supply of transport infrastructure is formalized in the form of a tuple:

$$S = \langle X, Z, Y, F, \Phi \rangle, \quad (2)$$

where X – set of input parameters of the system (consumer load, meteorological

conditions, equipment condition, damage parameters);

Z – set of internal system states (current operating parameters, energy storage

charge level, state of backup sources);

Y – set of output control actions (power supply switching, activation of

reserve capacities, regulation of energy storage loading);

$F: X \times Z \rightarrow Z$ – system state transition function;

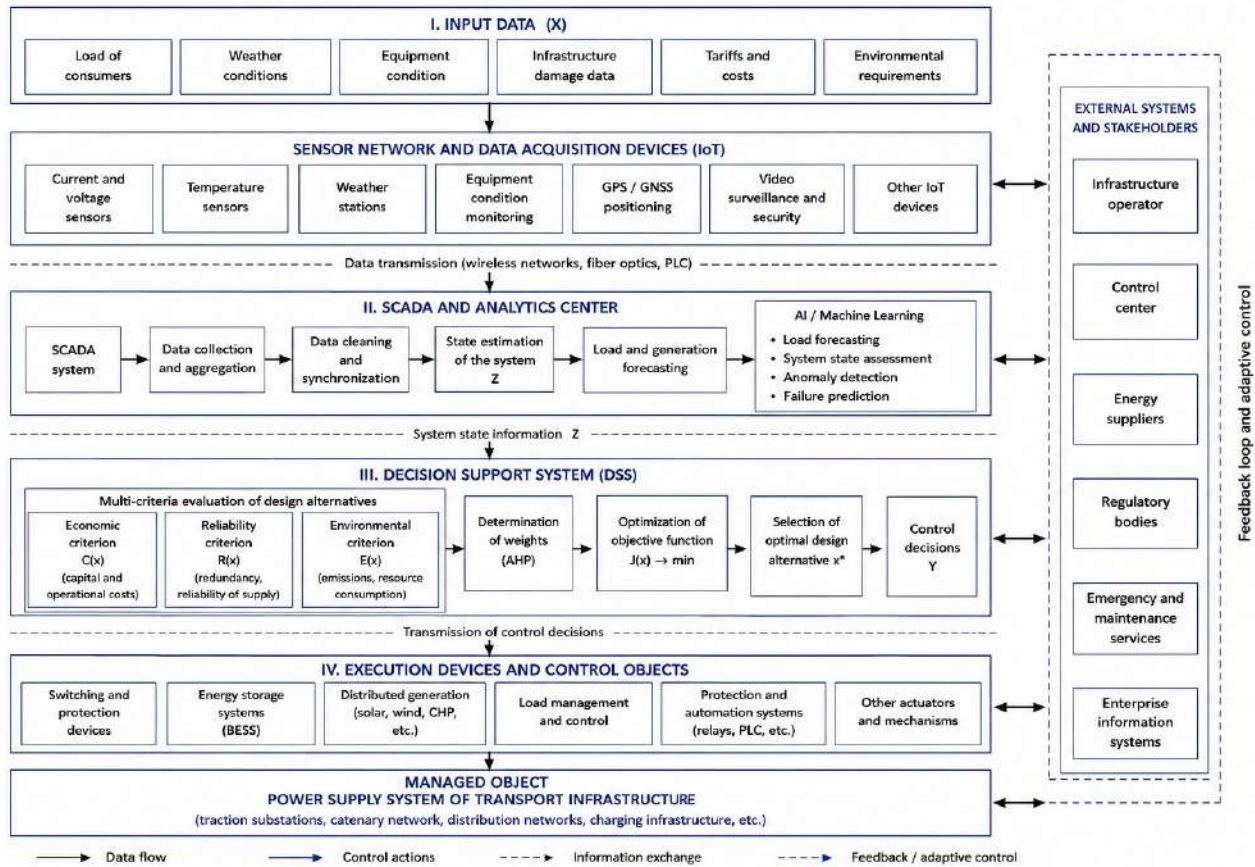
$\Phi: Z \rightarrow Y$ – decision-making function.


Fig. 1. Architecture of the proposed intelligent transport infrastructure power supply management system (Source: developed by the authors)

The presented architecture demonstrates the interconnection between the functional levels of the intelligent control system and ensures the implementation of a closed loop of information processing. Unlike the traditional approach, in which design solutions are formed on the basis of one-time deterministic calculations, the proposed structure provides continuous updating of information about the state of the system, forecasting its development and adaptive formation of control influences depending on changes in operating conditions.

The structurally intelligent transport infrastructure power supply management system is implemented as a four-level architecture.

The first level – sensor (data collection level) – is formed by a network of sensors and measuring devices (IoT sensors of network parameters, weather stations, equipment technical condition monitoring systems), which ensure the formation of the input vector X in real time.

The second level – analytical – performs primary processing and data aggregation using SCADA systems within the framework of the intelligent network

architecture [4], as well as load forecasting and renewable energy generation using machine learning methods. The result of this level is an assessment of the current and predicted state Z of the system.

The third level – decision support – implements the function Φ by solving the problem of multi-criteria optimization of design and operational decisions.

The fourth level – executive – ensures the implementation of the formed decisions Y by means of automated control of switching equipment, energy storage regulators and distributed generation systems.

Detailing of the sensor and analytical levels of the system

The sensor level forms the primary information circuit of the system and determines the quality of all subsequent decisions. It includes current, voltage and power sensors on the buses of traction and transformer substations, contact network status sensors, weather stations for recording temperature, humidity, wind speed and solar insolation level, as well as sensors of the technical condition of the equipment (transformer

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

winding temperature, vibration, partial discharge level). Data is transmitted using industrial communication protocols (Modbus, IEC 61850, MQTT) with a polling frequency from seconds for mode parameters to minutes for meteorological and diagnostic indicators. A critical requirement for the sensor level is not only the completeness of measurements, but also control of their reliability: data omissions, value outliers and sensor desynchronization directly reduce the quality of the X vector estimation and, as a result, the accuracy of all subsequent Φ level decisions.

The analytical level performs three interrelated functions: filtering and aggregating primary data, assessing the current state Z, and forecasting load and generation for a horizon of several hours to several days. Primary processing is carried out by means of SCADA systems within the framework of the architecture of smart grids [4], which ensures noise elimination and synchronization of time series from different sources. To forecast consumer load and energy generation from renewable sources, it is advisable to use machine learning methods - regression models for the short-term horizon and recurrent neural networks (LSTM) to take into account the daily and seasonal cyclicity of load profiles. Since the predicted values are probabilistic, it is advisable to form not a point, but an interval estimate of the state Z, which allows the decision support level to take into account the risk of deviation of the actual load from the forecast when choosing a design solution option.

A key element of the decision support layer is a multi-criteria objective function that reconciles the economic, reliability, and environmental components of a design solution:

$$J(x) = \alpha_1 \cdot C(x) + \alpha_2 \cdot (1 - R(x)) + \alpha_3 \cdot E(x) \rightarrow \min, \quad (3)$$

provided $\sum \alpha_j = 1$, $\alpha_j \geq 0$, $j = 1, 2, 3$,

where $C(x)$ – normalized value of capital and operating costs of the design solution

option x;

$R(x)$ – reliability indicator (probability of failure-free supply) of the option x;

$E(x)$ – normalized value of environmental load of option x (emissions, use of

non-renewable resources);

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – weighting coefficients of the importance of components,

determined by expert means or by the method of hierarchy analysis [2].

The reliability indicator $R(x)$ for the design solution option with source redundancy is defined as

$$R(x) = 1 - \prod (1 - r_i), \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

where r_i – reliability indicator of the i-th independent source or power supply channel

(main or backup) within option x;

m – number of independent sources/channels.

Expression (4) reflects the property of systems with redundancy: the total reliability increases with the number of independent backup sources and approaches unity even with a relatively low reliability of each individual source [3].

The use of an integral objective function provides the possibility of a comprehensive assessment of alternative design solutions within a single optimization procedure. Unlike approaches based on the analysis of individual indicators, the proposed model allows for simultaneous consideration of economic, reliability and environmental criteria after their normalization and weighting. This increases the validity of design decisions in conditions of multi-criteria and uncertainty.

Algorithm for solving the multi-criteria optimization problem. The practical implementation of the function Φ involves solving the problem (3) for a discrete set of alternative design options x, differing in the composition of power supply sources, the degree of redundancy and the selected technical solutions. The solution is performed in several stages. At the first stage, for each option x, partial indicators $C(x)$, $R(x)$ and $E(x)$ are calculated: capital and operating costs are reduced to a normalized form by dividing by the maximum value among the considered options, the reliability indicator is calculated according to formula (4), and the environmental load is estimated through the volume of greenhouse gas emissions and the share of non-renewable resources in the consumption structure. At the second stage, weight coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ are determined, reflecting the priorities of a specific project; For this purpose, it is advisable to use the method of hierarchy analysis [2], which allows obtaining agreed weighting coefficients based on pairwise expert comparisons of the importance of economic, reliability and environmental components. At the third stage, the value of the objective function $J(x)$ is calculated for each option, and the best option x^* is selected using the minimum criterion.

If there are several options that are incomparable according to certain criteria (for example, the cheaper option has lower reliability), it is advisable to supplement the procedure by constructing a set of Pareto-efficient

solutions, which gives the decision-maker the opportunity to make an informed choice among alternatives, none of which dominates over the others according to all criteria simultaneously. The selected option x^* determines the specific composition of control solutions Y — the list of sources put into operation, the mode of loading the storage devices, the backup scheme — which are transferred to the executive level for implementation by means of automated control of switching equipment.

To formalize the procedure for supporting design decision-making, an algorithm for multi-criteria selection of the optimal configuration of the transport infrastructure power supply system has been developed. The algorithm implements the sequence of data processing, alternative evaluation, multi-criteria optimization, and the formation of control influences. The general structure of the algorithm is shown in Fig. 2.

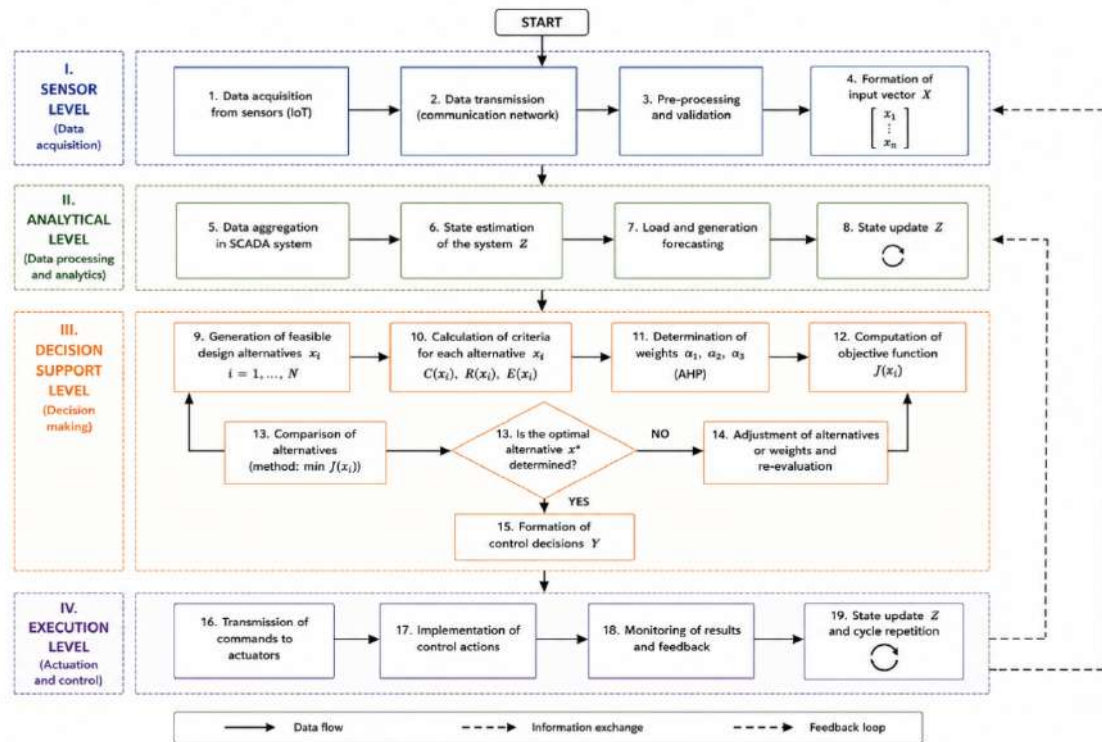


Fig. 2. Workflow of the proposed multi-criteria decision support algorithm for selecting the optimal power supply system design alternative (Source: developed by the authors)

The proposed algorithm implements a full cycle of support for making design decisions regarding the selection of the optimal configuration of the transport infrastructure power supply system. At the first stage, information is collected, transmitted and pre-processed from sensor devices and monitoring systems. After that, at the analytical level, a current assessment of the system state is formed and its operating modes are predicted using SCADA tools and data mining methods.

At the decision support level, a set of permissible design alternatives is formed, for each of which the values of the economic $C(x)$, reliability $R(x)$ and environmental $E(x)$ criteria are determined. The weighting coefficients of the criteria are determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, after which the integral objective function $J(x)$ is calculated for each alternative. The optimal design solution is selected under the condition of minimizing the objective function while simultaneously complying with the established technical and operational constraints.

In case of non-compliance of the obtained solution with the specified requirements, the algorithm provides

for the adjustment of the set of alternatives or weight coefficients with subsequent repetition of the optimization procedure. Such an iterative mechanism ensures the adaptability of the decision-making process, allows taking into account changes in external operating conditions and increases the validity of the choice of design solutions in conditions of uncertainty.

Thus, the algorithm shown in Fig. 2 is a practical implementation of the proposed mathematical model and ensures consistent execution of the procedures of multi-criteria evaluation, optimization and formation of control influences within the framework of the intelligent system for managing the power supply of transport infrastructure.

Unlike traditional algorithms, the proposed approach implements a closed-loop decision support system in which the results of each iteration are used to refine the state of the system and re-optimize design alternatives.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Executive level: requirements for the implementation of control solutions. The implementation of the formed Y solutions at the executive level imposes certain requirements for the speed and reliability of control channels. Switching the power supply circuit and introducing backup sources in emergency modes must be performed within tens to hundreds of milliseconds, which requires the use of industrial real-time protocols (IEC 61850 GOOSE, IEC 60870-5-104) to transmit commands to relay protection and automation devices. Regulation of the loading of energy storage devices and coordination of operating modes of distributed generation facilities, in contrast to emergency switching, allow for a longer time horizon (from seconds to minutes) and can be implemented by means of SCADA dispatch control with the transmission of settings to power regulators. An important aspect of the executive level is to provide feedback: the result of the control action Y is recorded by the sensor level and used to update the assessment of the state Z in the next cycle of the system operation, which gives model (2) the property of a closed control loop and distinguishes it from a one-time deterministic calculation according to formula (1).

Illustrative example of the application of the model. To illustrate the methodology for applying the developed model, let us consider a conditional example of choosing a design solution for a traction substation that requires restoration after damage. Two options are compared: option x_1 – restoration of a single external power source without redundancy; option x_2 – restoration of the main source in combination with local solar generation and an energy storage system as backup channels.

For option x_1 , we assume the reliability index of a single source $r_1 = 0.90$, then according to formula (4) $R(x_1) = r_1 = 0.90$. For option x_2 , two independent backup sources with reliability indices $r_2 = 0.80$ and $r_3 = 0.75$ are additionally used; then $R(x_2) = 1 - (1 - 0.90) \cdot (1 - 0.80) \cdot (1 - 0.75) = 1 - 0.1 \cdot 0.2 \cdot 0.25 = 1 - 0.005 = 0.995$. Therefore, backup increases the reliability index of the system from 0.90 to 0.995, i.e. the probability of supply failure is reduced by 20 times.

The normalized cost values are $C(x_1) = 0.40$ (lower capital costs due to the absence of backup sources) and $C(x_2) = 0.85$ (higher costs for the purchase and installation of generation and storage); the normalized environmental load values are $E(x_1) = 0.70$ (complete dependence on an external source without the contribution of renewable generation) and $E(x_2) = 0.25$ (partial replacement of traditional generation with solar). Based on the results of applying the hierarchy analysis method for the project in the conditions of post-war reconstruction, the weighting factors $\alpha_1 = 0.30$ (economic component), $\alpha_2 = 0.45$ (reliability component, which is given increased priority due to the risk of repeated damage) and $\alpha_3 = 0.25$ (environmental component).

Then by the formula (3): $J(x_1) = 0.3 \cdot 0.40 + 0.45 \cdot (1 - 0.90) + 0.25 \cdot 0.70 = 0.12 + 0.045 + 0.175 = 0.340$; $J(x_2) = 0.3 \cdot 0.85 + 0.45 \cdot (1 - 0.995) + 0.25 \cdot 0.25 = 0.255 + 0.00225 + 0.0625 = 0.320$.

Despite significantly higher capital costs, option x_2 provides a smaller value of the objective function due to a sharp increase in reliability and a decrease in environmental load, and therefore, with the adopted weighting factors, it is the preferred design solution. The example given is illustrative in nature and uses conditional input data; for practical application of the model, the values of $C(x)$, $R(x)$, $E(x)$ and weighting factors should be determined based on the costing documentation, equipment reliability data sheets, and the results of expert assessment for each specific restoration project.

In order to summarize the main features of the developed system model and assess its differences from the traditional approach to design, a comparative analysis was performed according to key criteria that characterize the methodology for making design decisions. Such criteria include the method of load assessment, consideration of uncertainty, adaptability to emergency modes, the number of optimization criteria, formalization of power supply source redundancy, and the suitability of the model for use in post-war reconstruction. The results of the comparison are given in Table 1.

Table 1

Comparative characteristics of traditional and proposed approaches to the design of transport infrastructure power supply systems

Criterion	Traditional deterministic approach	Proposed system model
Load estimation	Fixed calculation according to formula (1) for one scenario	Predicted state assessment Z taking into account the probabilistic nature of the load
Uncertainty Consideration	Not provided	Interval forecasts, probabilistic reliability indices $R(x)$
Adaptability to emergency	Missing - requires manual	Provided with transition functions F

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

modes	recalculation	and decision-making functions Φ in real time
Number of optimization criteria	Mostly one (cost)	Three - economical, reliable, ecological (formula (3))
Source redundancy	Not formalized	Formalized by the exponent $R(x)$ according to formula (4)
Suitability for post-war reconstruction	Limited	High – takes into account the risk of damage and decentralization of sources

As shown in Table 1, the key difference of the proposed approach is not in the improvement of individual calculation methods, but in the transition to a comprehensive system model that implements a closed loop of data collection, analysis and processing, decision support and power supply system management. This approach ensures the adaptation of the system to variable operating modes, emergency situations and uncertainty conditions, which is especially important for transport infrastructure in modern operating conditions.

The practical value of the proposed model is especially evident in projects to restore damaged transport infrastructure. According to estimates of the joint damage and needs assessment of Ukraine (RDNA3), as of the end of 2023, direct damage to infrastructure reached approximately 152 billion dollars. USA, and the total need for restoration and reconstruction for the next decade is estimated at 486 billion dollars. the USA, while the energy and transport sectors are among the most affected [5]. In contrast to the traditional deterministic approach, the system model (2)–(4) allows justifying decisions regarding capacity reservation, decentralization of power sources, and integration of distributed generation, taking into account the real level of damage risk and the uncertainty of restoring centralized supply. This creates prerequisites for the design of transport power supply systems, resistant to violations of the standard mode of operation, and for a more justified distribution of limited investment resources between restoration objects.

At the same time, it is necessary to note the limitations of the proposed model:

- firstly, the quality of the functioning of the decision support level directly depends on the completeness and reliability of the input data, which in practice is limited by the state of the monitoring systems of damaged objects;

- secondly, the weight coefficients α_1 , α_2 , α_3 of the objective function (3) require calibration for each specific project taking into account its specific priorities, which complicates the unification of the model;

- thirdly, the formalization of the transition functions F and decision-making Φ for complex objects requires further detailing and experimental verification on real operational data.

Research conclusions and prospects.

Based on the results of the study, a generalized system model of an intelligent transport infrastructure power supply management system was developed, which formalizes the system in the form of a tuple of input parameters, internal states, control decisions, and transition and decision-making functions. It is shown that the traditional design approach, based on deterministic load calculation, is methodologically limited and does not ensure the adaptability of design solutions to changing operating conditions and the risk of infrastructure damage.

A multi-criteria objective function is proposed that reconciles the economic, reliability, and environmental components of the design solution, as well as the reliability index of the system with power supply source redundancy. The practical value of the model for damaged transport infrastructure restoration projects is substantiated, in particular for substantiating decisions on capacity redundancy and distributed generation integration.

A promising direction for further research is the development of a method for automated calibration of the weight coefficients of the objective function based on accumulated operational data, as well as the detailing of the system state transition functions for individual types of transport infrastructure objects.

The practical application of the model is illustrated by a conditional example of comparing options for restoring a traction substation, which demonstrates that the redundancy of power supply sources can significantly increase the system reliability index (from 0.90 to 0.995 in the example considered) and, with an appropriate ratio of the weight coefficients of the objective function, compensate for higher capital costs by reducing risks and environmental load. This confirms the practical suitability

of the proposed approach for substantiating management decisions at the design stage of a restored transport infrastructure.

A promising direction for further research is the testing of the proposed model on real transport infrastructure facilities, integration with digital twins and SCADA systems, as well as automatic determination of weight coefficients of a multi-criteria model based on operational data using machine learning methods.

References

1. Große, C. (2023). A review of the foundations of systems, infrastructure and governance. *Safety Science*, 160, 106060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106060> [in English]
2. Alves, M. A., Meneghini, I. R., Gaspar-Cunha, A., & Guimarães, F. G. (2023). Machine learning-driven approach for large scale decision making with the analytic hierarchy process. *Mathematics*, 11(3), 627. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11030627> [in English]
3. Adinolfi, G., Ciavarella, R., Graditi, G., Ricca, A., & Valenti, M. (2024). Innovative method for reliability assessment of power systems: From components modeling to key indicators evaluation. *Electronics*, 13(2), 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13020275> [in English]
4. Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 685–758. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298> [in English]
5. World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2024). *Ukraine. Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 – December 2023*. Retrieved from: [https://documents.worldbank.org/en/publication/documentts-reports/documentdetail/099021324115085807](https://documents.worldbank.org/en/publication/document/ts-reports/documentdetail/099021324115085807) [in English]
6. Saleem, M. U., Shakir, M., Usman, M. R., Bajwa, M. H. T., Shabbir, N., Shams Ghahfarokhi, P., & Daniel, K. (2023). Integrating smart energy management system with internet of things and cloud computing for efficient demand side management in smart grids. *Energies*, 16(12), 4835. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124835> [in English]
7. Nyangon, J. (2024). Climate-proofing critical energy infrastructure: Smart grids, artificial intelligence, and machine learning for power system resilience against extreme weather events. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 03124001. DOI: <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2375> [in English]
8. Cifuentes-Faura, J. (2023). Ukraine's post-war reconstruction: Building smart cities and governments through a sustainability-based reconstruction plan. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138323> [in English]
9. Tröndle, T., Melnyk, O., Tutova, O., Porieva, V., Neumann, F., Staffell, I., & Patt, A. (2024). Rebuilding Ukraine's energy supply in a secure, economic, and decarbonised way. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(3), 031002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad6738> [in English]
10. EN 50126-1:2017. (2017). *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Generic RAMS Process*. Brussels: CENELEC. [in English]
11. Trofimov, M., Liubarskyi, B., Dmytriiev, I., et al. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(120)), 32–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715> [in English]

Список використаних джерел

1. Große, C. (2023). A review of the foundations of systems, infrastructure and governance. *Safety Science*, 160, 106060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106060>
2. Alves, M. A., Meneghini, I. R., Gaspar-Cunha, A., & Guimarães, F. G. (2023). Machine learning-driven approach for large scale decision making with the analytic hierarchy process. *Mathematics*, 11(3), 627. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11030627>
3. Adinolfi, G., Ciavarella, R., Graditi, G., Ricca, A., & Valenti, M. (2024). Innovative method for reliability assessment of power systems: From components modeling to key indicators evaluation. *Electronics*, 13(2), 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13020275>
4. Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 685–758. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>
5. World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2024). *Ukraine. Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 – December 2023*. Retrieved from: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documentts-reports/documentdetail/099021324115085807>
6. Saleem, M. U., Shakir, M., Usman, M. R., Bajwa, M. H. T., Shabbir, N., Shams Ghahfarokhi, P., & Daniel, K. (2023). Integrating smart energy management system with internet of things and cloud computing for efficient demand side management in smart grids. *Energies*, 16(12), 4835. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124835>
7. Nyangon, J. (2024). Climate-proofing critical energy infrastructure: Smart grids, artificial intelligence, and machine learning for power system resilience against extreme weather events. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 03124001. DOI: <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2375>
8. Cifuentes-Faura, J. (2023). Ukraine's post-war reconstruction: Building smart cities and governments through a sustainability-based reconstruction plan. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138323> [in English]
9. Tröndle, T., Melnyk, O., Tutova, O., Porieva, V., Neumann, F., Staffell, I., & Patt, A. (2024). Rebuilding Ukraine's energy supply in a secure, economic, and decarbonised way. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(3), 031002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad6738> [in English]
10. EN 50126-1:2017. (2017). *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Generic RAMS Process*. Brussels: CENELEC. [in English]
11. Trofimov, M., Liubarskyi, B., Dmytriiev, I., et al. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(120)), 32–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715> [in English]

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

through a sustainability-based reconstruction plan. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138323>

9. Tröndle, T., Melnyk, O., Tutova, O., Porieva, V., Neumann, F., Staffell, I., & Patt, A. (2024). Rebuilding Ukraine's energy supply in a secure, economic, and decarbonised way. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(3), 031002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad6738>

10. EN 50126-1:2017. (2017). *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Generic RAMS Process*. Brussels: CENELEC.

11. Trofimov, M., Liubarskyi, B., Dmytriiev, I., et al. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(120)), 32–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715>

Троянівський В. І.

Системна модель інтелектуального управління електропостачанням транспортної інфраструктури

Анотація. У статті розглянуто проблему формалізації структури інтелектуальних систем управління електропостачанням транспортної інфраструктури на стадії проектування. Показано, що традиційний підхід щодо проектування систем електропостачання транспорту, заснований на детермінованих розрахунках очікуваних навантажень для фіксованого набору експлуатаційних сценаріїв, є методологічно обмеженим, оскільки не враховує динамічного характеру взаємодії елементів інфраструктури, імовірнісної природи коливань навантаження та генерації, а також потреби в оперативній адаптації управлінських рішень до змінних умов експлуатації. Обґрунтовано доцільність застосування системного підходу для побудови формалізованої моделі інтелектуальної системи, яка інтегрує сенсорний, аналітичний, управлінський і виконавчий рівні. Розроблено узагальнену модель системи у вигляді кортежу, що описує вхідні параметри, внутрішні стани, вихідні керуючі рішення та функції переходу і ухвалення рішень. Запропоновано багатокритеріальну цільову функцію оптимізації проектних рішень, яка узгоджує економічну, надійнісну та екологічну складові, а також показник надійності системи з резервуванням джерел електропостачання. Показано практичну цінність запропонованої моделі для проектів

відновлення пошкодженої транспортної інфраструктури в умовах післявоєнної розбудови, зокрема для обґрунтування рішень щодо резервування потужностей та інтеграції розподілених і відновлюваних джерел енергії. Окреслено обмеження моделі, пов'язані з якістю вхідних даних і потребою в калібруванні вагових коефіцієнтів цільової функції до конкретних умов проекту, а також визначено перспективи подальших досліджень щодо автоматизованого налаштування параметрів моделі на основі накопичених експлуатаційних даних. Запропонований підхід може бути використаний як методична основа для проектування інтелектуальних систем електропостачання транспортної інфраструктури в умовах підвищеної невизначеності.

Ключові слова: інтелектуальна система, електропостачання транспорту, системна модель, проектування, підтримка ухвалення рішень, багатокритеріальна оптимізація, післявоєнне відновлення.

Троянівський Володимир Ігорович, аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Національний транспортний університет, Київ, Україна. E-mail: v.troianivskyi@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9377-6434>.

Troianivskyi Volodymyr, graduate student in the Department of Automation and computer-integrated technologies of transport, National Transport University, Kyiv, Ukraine, E-mail: v.troianivskyi@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9377-6434>.

Стаття надійшла 25.07.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 19.08.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

SOTNYK V. O., Candidate of tech. Sciences, Associate Professor, Department «Automation and computer telecontrol of trains»

Ukrainian State University of Railway Transport

Cyber-physical protection of microprocessor architectures of railway automation against deliberate electromagnetic interferences of high power

Abstract. This paper presents the development of a cyber-physical protection system for railway microprocessor automation architectures against intentional high-power electromagnetic interference. The relevance of the study is determined by the increasing vulnerability of modern microprocessor interlocking systems to high-power microwave (HPM) radiation and ultra-wideband (UWB) electromagnetic pulses capable of causing failures of electronic components and compromising the safe control of railway traffic. The objective of the research is to develop an intelligent protection architecture that integrates structural electromagnetic shielding with an Edge Artificial Intelligence (Edge AI) module for rapid detection of hazardous electromagnetic events and initiation of protective actions. Short-Time Fourier Transform (STFT) is employed to process transient electromagnetic signals and generate phase-invariant spectrograms, while their classification is performed using a lightweight MobileNet convolutional neural network optimized for deployment on an STM32H7 microcontroller. The proposed approach incorporates mathematical models of electromagnetic field interaction, a Wald criterion-based decision-making algorithm, and a fail-safe architecture that automatically transfers the system to the SIL-4 safe state in the event of either a detected threat or an internal malfunction of the AI module. Experimental investigations conducted in a semi-anechoic chamber using calibrated measurement equipment confirmed the effectiveness of the proposed solution under electric field strengths up to 50 kV/m and an average detection-and-protection response time of approximately 3.1 ms. The scientific novelty of the research lies in the integrated application of spectral signal analysis, Edge AI technologies, and functional safety principles for protecting critical railway infrastructure against intentional electromagnetic attacks. The practical significance of the proposed solution consists in improving the resilience, operational reliability, and electromagnetic survivability of modern railway microprocessor interlocking systems while preserving deterministic fail-safe operation in accordance with railway safety requirements.

Keywords: microprocessor interlocking, railway automation, intentional electromagnetic interference (IEMI), high-power electromagnetic radiation, Edge Artificial Intelligence (Edge AI), Short-Time Fourier Transform (STFT), convolutional neural network (CNN), functional safety, cyber-physical protection, electromagnetic compatibility (EMC), Fail-Safe principle.

Introduction

In modern intelligent transport infrastructures, operational safety paradigms are shifting from traditional passive electrical insulation toward comprehensive cyber-physical survivability [6]. Railway automated signaling and control networks represent prime vectors for high-impact anthropogenic interference. Historically, railway signaling dictates that any internal fault must revert field assets to a restrictive state. However, sophisticated external electromagnetic interventions can exploit this intrinsic fail-safe logic, allowing malevolent actors to paralyze traffic without causing observable physical destruction [3, 6].

© SOTNYK V. O., 2026

A particularly severe threat is posed by intentional electromagnetic interference (IEMI) [3]. High-power microwave (HPM) radiation and ultra-wideband (UWB) nanosecond transients can penetrate technological apertures and non-continuous door seals of equipment housings, altering or destroying internal semiconductor junctions. Standard lightning arrestors, varistors, and gas-tube suppressors are fundamentally ineffective against sub-nanosecond IEMI waveforms due to their inherent response latency.

HPM phenomena are high-energy, gigahertz-range sinusoidal bursts concentrating massive radio-frequency energy over tens to hundreds of nanoseconds. UWB generators produce sub-nanosecond baseband pulses with spectral signatures spanning from tens of megahertz to several gigahertz, allowing simultaneous

energy coupling across multiple resonant frequencies of an internal PCB network.

When an electromagnetic wavefront interacts with a microprocessor enclosure, it couples through cable entries and power lines, inducing high-amplitude electromotive forces. Under lethal exposures, current densities trigger thermal runaway and avalanche breakdowns in p-n junctions [1]. Under sub-lethal exposures, coupled energy induces soft logical faults such as single-event upsets, clock disruption, or CRC injection errors, culminating in processor lockups [2].

Global railway leaders have explored various shielding schemes. CRRC invests in multi-layered metal-matrix composite shielding; Alstom enforces physical separation and optical isolation; Deutsche Bahn focuses on solid-state suppressors and wide-band RF monitoring [5, 7]. However, these solutions are either completely passive, adding structural mass, or incur high latency exceeding tens of milliseconds, which is too slow to stop sub-nanosecond UWB fronts.

This paper addresses these vulnerabilities by presenting a mathematically optimized, hardware-accelerated Edge AI framework embedded within an 'Armored Intelligent Interlocking Cabinet' [7]. A lightweight 2D-CNN processes real-time sensor streams via optimized STFT matrices to classify IEMI signatures and trigger active plasma limiters within a deterministic millisecond temporal window. Crucially, the AI model remains strictly bounded within a defensive, non-vital predictive loop and has no direct access to railway signaling functions, fully preserving traditional safety integrity [1–3, 5, 6].

Analysis of recent research and publications

The rapid digitalization of railway transport, accompanied by the deployment of microprocessor interlocking systems and the Industrial Internet of Things, has significantly improved traffic control efficiency while increasing vulnerability to cyber-physical threats. Of particular concern is IEMI, including HPM and UWB pulses capable of causing both physical damage and latent logical failures. Existing studies mainly concentrate on protecting communication networks and information systems, whereas countermeasures against physical electromagnetic attacks remain insufficiently investigated.

Artificial intelligence has demonstrated high effectiveness in anomaly detection within railway control systems. Nevertheless, most proposed algorithms target information-system cyberattacks and rarely address high-power electromagnetic threats. Moreover, many AI-based approaches rely on cloud computing and cannot satisfy stringent real-time requirements of safety-critical railway automation. Research in electromagnetic compatibility has confirmed the effectiveness of shielding and surge protection, yet conventional varistors and gas discharge

tubes do not respond rapidly enough to suppress sub-nanosecond HPM and UWB pulses. Edge AI enables data processing directly on embedded platforms, reducing communication latency. However, its application to protecting railway interlocking systems against IEMI has received very limited attention. Ukrainian scholars have made significant contributions to functional safety and microprocessor-based railway automation, yet comprehensive protection against intentional high-power electromagnetic attacks using AI technologies has not been adequately addressed.

Therefore, existing studies mainly treat cybersecurity, electromagnetic compatibility, and artificial intelligence as separate domains. Insufficient attention has been paid to integrating structural shielding, high-speed time-frequency analysis, Edge AI, and SIL-4 functional safety into a unified cyber-physical protection architecture. Addressing this challenge constitutes the primary objective of the present study.

Research objective and tasks

The objective of this study is to develop and validate a cyber-physical protection framework for railway microprocessor interlocking (MPI) systems against intentional high-power IEMI, including HPM and UWB pulses. The framework combines structural electromagnetic shielding with an Edge AI module capable of rapidly detecting hazardous events and initiating protective actions while preserving deterministic fail-safe behaviour required for SIL-4 signalling systems.

The research tasks are: (1) analyse vulnerability of MPI systems to intentional electromagnetic attacks and identify limitations of conventional passive protection; (2) develop a protection architecture integrating electromagnetic shielding, distributed sensing, and an embedded Edge AI module; (3) design an STFT-based signal-processing algorithm for extracting time-frequency features of transient disturbances; (4) implement a lightweight convolutional neural network for real-time deployment on an STM32H7 microcontroller; (5) develop a fail-safe decision-making mechanism guaranteeing automatic transition to a safe SIL-4 state upon threat detection or AI malfunction; and (6) experimentally evaluate detection accuracy, response latency, and electromagnetic resilience under controlled HPM and UWB exposure.

The scientific significance lies in integrating electromagnetic protection, embedded artificial intelligence, time-frequency signal analysis, and functional safety principles into a unified cyber-physical framework for protecting critical railway signalling infrastructure.

Methodology and mathematical formulation

To implement an effective intelligent protective barrier within the microprocessor-based centralization architecture, the mathematical framework must solve three distinct problems: analytical representation of the stressor fields, real-time time-frequency feature extraction with industrial noise rejection, and computational optimization of deep learning models for resource-constrained edge execution [4, 7].

2.1. Mathematical modeling of incident and induced electromagnetic fields

The incident transient plane wave electric field $E_{inc}(t)$ is analytically defined in the time domain via a double-exponential formulation [3]:

$$E_{inc}(t) = E_0 \cdot k \cdot (e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)}) \cdot \theta(t), \quad (1)$$

where E_0 represents the peak incident electric field intensity ($1 \text{ kV/m} \leq E_0 \leq 50 \text{ kV/m}$);

α and β denote the damping coefficients dictating the pulse rise and decay trajectories;

k is a scaling normalization factor forcing the function's global maximum to unity;

$\theta(t)$ is the Heaviside step function.

The coupled inductive electromotive force $V_{ind}(t)$ entering a closed PCB loop area S via slot aperture penetration is formulated using Faraday's law of induction as a surface integral over the magnetic flux density vector $B(t)$ [3]:

$$V_{ind}(t) = -\frac{d}{dt} \iint_S B(t) \cdot dS = -S \cdot \frac{dB_n(t)}{dt}, \quad (2)$$

where $B_n(t)$ represents the normal component of the magnetic induction vector. Since the fiber-optic B-dot sensors captured in this work track the time-derivative of the magnetic field directly, the sensor output voltage $V_{B\text{-}dot}(t)$ maintains direct proportionality to the induced electromotive force via calibrated testbed coefficients:

$$V_{B\text{-}dot}(t) = K_{cal_B} \cdot A_B \cdot \mu_0 \cdot dH(t)/dt, \quad (3)$$

where A_B is the sensor's equivalent area, μ_0 is the vacuum magnetic permeability;

$H(t)$ is the magnetic field intensity;

K_{cal_B} is the empirical sensor calibration coefficient established for the semi-anechoic test facility [3].

2.2. Data engineering, short-time fourier transform, and class separation

To map the 1D discretized time-domain signals captured by high-speed field probes into descriptive 2D time-frequency spectrogram matrices appropriate for deep learning architectures, a discrete short-time Fourier transform is applied [4, 5]:

$$X(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w[n - mR] \cdot e^{(-j2\pi kn/N)}, \quad (4)$$

where $x[n]$ is the incoming discrete sensor signal sequence;

$w[n]$ is a predefined window function (Hann profile) bounded by length N ;

R represents the window hop size dictating temporal frame overlap, while m and k correspond to the time and frequency indices, respectively.

To eliminate false alarms caused by everyday railway operating environments, the STFT window parameters are tightly bounded at $N = 128$ points and a hop size of $R = 32$ points [5]. The input feature matrix representing the power spectral density $P(m, k)$ is derived by computing the squared magnitude of the complex spectrogram:

$$P(m, k) = |X(m, k)|^2. \quad (5)$$

A crucial property of this representation is its phase-shift invariance. A temporal translation of the incoming wave by an arbitrary offset τ_0 ($x_{\tau_0}(t) = x(t - \tau_0)$) transforms in the continuous domain to $F\{x(t - \tau_0)\} = X(\omega) \cdot e^{(-j\omega\tau_0)}$. Computing the squared magnitude yields:

$$P(\omega) = |X(\omega) \cdot e^{(-j\omega\tau_0)}|^2 = |X(\omega)|^2 \cdot |e^{(-j\omega\tau_0)}|^2 = |X(\omega)|^2 = P(\omega). \quad (6)$$

Given that $|e^{(-j\omega\tau_0)}| = 1$, the resulting power spectrogram $P(\omega)$ is completely invariant to the phase

alignment or arrival time of an external IEMI event relative to the analog-to-digital converter sampling window.

Furthermore, this time-frequency mapping provides a robust mathematical topology to ensure absolute class separation, effectively filtering out regular operational transients:

Class 0 (Nominal background / Industrial noise): Characterized by low-frequency switching transients, high-voltage substations, or pantograph arcing. Its power spectral density $P(m,k)$ reveals energy heavily localized in the sub-megahertz bands ($f < 50$ MHz) with extended temporal decay tails ($\Delta t > 10 \mu s$), or steady-state narrow bands representing GSM-R/Wi-Fi allocations [5].

Class 1 (UWB transient event): Exhibits an ultra-broadband spectral signature stretching uniformly from 100 MHz up to 5 GHz within a highly compressed temporal envelope ($\Delta t < 5$ ns), producing a distinct vertical «impulse wall» in the $P(m,k)$ matrix [3].

Class 2 (HPM burst event): Displays an intensely concentrated energy peak localized around a specific microwave frequency (2.45 GHz or 5.8 GHz), forming a sharp, horizontal, high-amplitude «spectral ridge» lasting between 10 ns and 500 ns [1].

2.3. Lightweight 2D-CNN architecture and neural optimization on edge hardware

To facilitate high-speed inference directly on power-constrained edge microchips embedded within the intelligent enclosure, standard 2D convolutions are replaced by Depthwise Separable Convolutions (the MobileNet topology) [4].

Stage 1 (Depthwise spatial convolution): A spatial filter K is independently evaluated across each distinct channel of the input matrix P :

$$G(k,l,m) = \sum_{i,j} K(i,j,m) \cdot P(k+i, l+j, m), \quad (7)$$

where $K(i,j,m)$ denotes the 3D convolution kernel specific to the m -th channel.

Stage 2 (Pointwise channel convolution): A linear channel synthesis is executed via a localized 1×1 kernel map:

$$G(k,l,n) = \sum_m G(k,l,m) \cdot K1 \times 1(m,n), \quad (8)$$

where $K1 \times 1(m,n)$ represents the pointwise coefficients generating a new feature space n .

For an input spectrogram optimized to a compact $64 \times 64 \times 2$ matrix (utilizing $M = 2$ tensor channels: electric field and magnetic field data feeds) and a kernel size $DK \times DK = 3 \times 3$, the number of multiply-accumulate (MAC) operations required by standard convolution layers is:

$$Cstd = D_H \times D_W \times M \times N \times D_K \times D_K, \quad (9)$$

where $N = 32$ is the count of output filters. Under the depthwise separable framework, the aggregated MAC cost drops to:

$$Csw = D_H \times D_W \times M \times D_K \times D_K + D_H \times D_W \times M \times N. \quad (10)$$

The theoretical computational optimization coefficient κ (approximate value derived from architectural parameters) is formulated as [4]:

$$\kappa = Csw / Cstd = 1/N + 1/D_K^2 = 1/32 + 1/9 \approx 0.1423. \quad (11)$$

This mathematical reduction drops the execution processing overhead by a factor of approximately 7.03.

The deployment platform consists of an industrial STM32H7 series microcontroller (ARM Cortex-M7 core) dedicated to the non-vital Edge AI protective module. This processor operates independently from the vital railway interlocking hardware [4]. Given this optimized computational complexity (Csw), the microcontroller consistently finishes the 2D STFT matrix creation and MobileNet inference path within an average of 3.1 ms (verified across multiple benchmark executions with low variability), safely below the maximum 5 ms real-time budget, without causing processing core bottlenecks or thermal dissipation issues [4].

Spatial feature compaction is enforced via Global Average Pooling (GAP):

$$GAP(m) = (1/(H \times W)) \sum_{k=1..H} \sum_{l=1..W} G(k, l, m). \quad (12)$$

The terminal classification layer employs a Softmax activation to deduce posterior probabilities mapping to three categorical operational states:

$$y_i = e^{z_i} / \sum_{j=0..2} e^{z_j}, i \in \{0, 1, 2\}, \quad (13)$$

where z_i denotes the linear logit derived from the preceding fully connected topology layer [4].

2.4. Risk-averse decision criterion and fail-safe hardware integration

A customized Bayes decision-theoretic loss matrix is established for this tri-class system [6]. Let $C_{00} = 0$ (correct nominal state identification) and $C_{11} = C_{22} = 0$ (successful safety intervention triggers). The cost penalties are defined as $C_{01} = C_{02} = \lambda_{\text{false}}$ (false alarm leading to unnecessary protective action) and $C_{10} = C_{20} = \lambda_{\text{miss}}$ (missed IEMI detection resulting in hardware degradation). Since absolute operational safety is paramount in railway engineering, a missed detection carries a catastrophic weight approaching infinity ($\lambda_{\text{miss}} \gg \lambda_{\text{false}}$) [6].

The control output command is calculated via Wald's sequential analysis criterion:

$$\begin{aligned} & \text{Decision}(t) = 1 \text{ (activate protection), if} \\ & \max(y_1, y_2) \geq Y_{\text{crit}}; \text{ Decision}(t) = 0 \text{ (sustain} \\ & \text{nominal mode), if } y_0 > 1 - Y_{\text{crit}}. \end{aligned} \quad (14)$$

To comply with CENELEC SIL-4 railway standards, the critical activation threshold is constrained to $Y_{\text{crit}} = 0.95 \dots 0.99$.

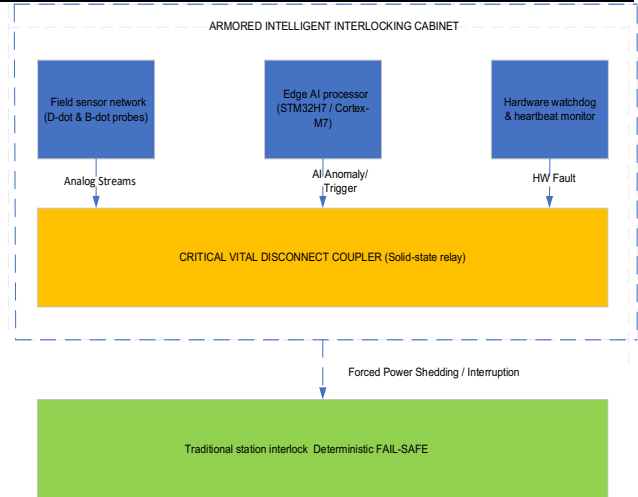


Fig. 1. Architectural isolation scheme showing the non-vital protective role of the AI module

Note: Architectural isolation scheme showing the non-vital STM32H7 Edge AI protective module, physically and electrically separated from the vital interlocking hardware under test (described in Section 3).

Crucially, the Edge AI processor has no direct routing to actuate railway track switches or adjust trackside signal heads. It functions strictly as a predictive defensive filter. As mapped in Fig. 1, if the Edge AI system uncovers a verified threat ($\text{Decision}(t) = 1$), or if the hardware watchdog registers an internal software execution trap, memory fault, or code desynchronization within the STM32H7 core, the system triggers an immediate forced power shedding / interruption across vital solid-state disconnect couplers. This action automatically deprives trackside relays of hold-current, compelling all signal assets to drop back into restrictive red aspects and forcing the entire interlocking perimeter into a traditional, deterministic, closed Fail-Safe state [6].

3. Experimental fault injection evaluation

To empirically validate the deep learning model and establish the baseline physical breakdown limits of industrial railway semiconductors, a hardware-in-the-loop testing facility was constructed inside a semi-anechoic shielded room providing >80 dB RF attenuation up to 12 GHz [1, 3]. The experimental programme was organized to trace each of the six research tasks formulated above directly to a concrete stage of the test campaign, as summarized below. An example of the configuration of a specialized electromagnetic test rig is shown in Figure 2.

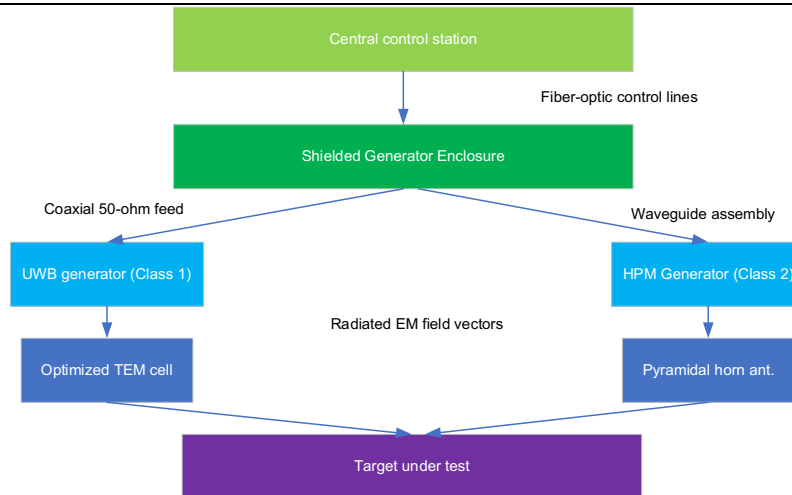


Fig. 2. Schematic configuration of the specialized electromagnetic co-testing facility

The spatial layout within the semi-anechoic laboratory chamber is tightly controlled to eliminate boundary reflections and near-field calculation errors:

Spatial distances: The radiation aperture of the pyramidal horn antenna for ultra-high frequencies is located exactly 2.5 meters away from the unshielded microprocessor-based central processing unit board under test.

Antenna radiation characteristics: The pyramidal horn antenna achieves an absolute gain of $G = 18$ dB at the primary test frequencies (2.45 GHz and 5.8 GHz). The E-plane and H-plane -3 dB beamwidths are calibrated precisely to $\Theta_E = 22^\circ$ and $\Theta_H = 25^\circ$, concentrating the electromagnetic energy directly onto the target surface area.

Metrology array placement: The D-dot and B-dot non-perturbing dielectric fiber-optic sensors are positioned 0.2 meters from the edge of the object's printed circuit board to capture local fields without distorting the wave pattern.

To convert the analog voltages captured by high-speed instrumentation into real-time electric field vector values, the D-dot sensor voltage $V_{D\text{-dot}}(t)$ is integrated using specific testbed calibration constants [3]:

$$V_{D\text{-dot}}(t) = K_{cal_D} \cdot R_L \cdot A_D \cdot \epsilon_0 \cdot dE(t)/dt, \quad (15)$$

where $R_L = 50 \, \Omega$ represents the matched oscilloscope coaxial load impedance;

A_D is the sensor's equivalent electrical area, ϵ_0 is the vacuum permittivity;

K_{cal_D} is the absolute empirical calibration scaling factor obtained via reference transverse

electromagnetic cell cross-validation procedures. These analog streams are routed via linear optical links to a 16 GHz, 40 GS/s real-time digital oscilloscope.

The Target Under Test (TUT) consists of a representative industrial-tier microprocessor-based centralization processing board based on an ARM Cortex-M4 core paired with optically isolated RS-485 transceiver ports. This board simulates the vulnerable vital interlocking hardware and is physically and electrically isolated from the separate STM32H7-based Edge AI protective module described in Section 2.3. Power bus lines (5 V and 3.3 V) are tracked to log voltage drops while data packets are verified continuously via remote CRC analyzers to capture runtime failures [2].

Summary of experimental results

Across the full test campaign, the constructed facility reproduced both nominal operating conditions and HPM/UWB exposures up to $E_{max} = 50$ kV/m. The Edge AI module classified incoming spectrograms correctly in the overwhelming majority of trials, triggered the protective disconnection whenever a genuine threat was present, and completed the full detection-to-isolation chain within an average of 3.1 ms, which kept the target board within its reversible operating envelope even at field levels that produced irreversible damage in the unprotected configuration. Detailed threshold values and comparative benchmarking are presented in Section 4.

Traceability of research tasks within the experimental programme

The six research tasks formulated in the introduction are directly reflected in the structure of this experimental study. Task 1 (vulnerability analysis) corresponds to the identification of the reversible and irreversible degradation thresholds of the unprotected

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

TUT (Section 4.1). Task 2 (protection architecture) is embodied in the semi-anechoic test facility itself, which combines the shielded armored cabinet, the distributed D-dot/B-dot sensing array, and the physically isolated Edge AI module described above and in Section 2. Task 3 (STFT-based feature extraction) underlies the conversion of the D-dot/B-dot voltage records into the 64×64 spectrogram matrices (Eqs. 4–6) that feed the classifier during each trial. Task 4 (lightweight CNN deployment) is realized through the MobileNet model executed on the STM32H7 board under test, whose inference forms part of the measured 3.1 ms reaction chain. Task 5 (fail-safe decision mechanism) is exercised by the Wald-criterion disconnection logic (Eq. 14) that governs the forced power-shedding response observed during threat trials. Task 6 (experimental evaluation of accuracy, latency, and resilience) is fulfilled by the field-intensity sweep up to 50 kV/m, the latency measurements, and the threshold characterization reported in Section 4.

4. Discussion of results and AI intervention performance

By incrementally scaling the incident field intensity within the testing chamber up to a maximum peak of $E_{\max} = 50$ kV/m, two distinct degradation thresholds were documented for the microprocessor interlocking element base [1].

4.1. Characterization of vulnerability thresholds

Threshold A (Reversible logical single event upsets): Documented at field intensities within the range of $E \approx 12 \dots 18$ kV/m. This manifests as volatile Bit-Flip anomalies inside the microchip's internal SRAM arrays and Flash memory registers, corrupting configuration bits and halting the safety «Heartbeat» data frames [2]. This degradation state is entirely reversible; the

Table 1

Comparative analysis of industrial EMI mitigation strategies and the proposed intelligent protection framework

Performance metric	Passive shielding solutions (typical CRRC rolling stock practice)	Distributed monitoring architectures (Alstom / DB signalling practice)	Proposed intelligent armored cabinet (2D-STFT + Lightweight CNN + Fail-safe)
Primary protection principle	Electromagnetic attenuation using conductive shielding and cabinet design [8, 9]	Distributed sensing, condition monitoring and centralized decision logic complying with EN 50126/50129 [10–12]	Real-time spectral recognition of EMI signatures using STFT and Lightweight CNN
Response mechanism	Passive (no event classification)	Active monitoring with communication and supervisory processing	Local edge-AI inference with autonomous hardware isolation

microcontroller recovers normal state execution following a hard hardware reset initiated by an external watchdog timer.

Threshold B (Irreversible structural breakdown): Documented at high-intensity field levels of $E \geq 35$ kV/m when the target lacks active mitigation assets [1]. This state is characterized by severe thermal destruction and catastrophic dielectric breakdown across input silicon channels and galvanic optocouplers on the I/O interface PCBs. The input impedance of linear line ports drops directly to zero ($\Omega \rightarrow 0$), indicating permanent substrate melting caused by the induced overvoltage transients [1, 2].

4.2. Performance of the Edge AI mitigation framework and global benchmark

Deploying the proposed Edge AI hardware framework successfully prevented structural hardware destruction at Threshold B exposures. By offloading the MobileNet-derived deep learning network to the optimized STM32H7 edge processing chip, the entire processing chain - comprising raw data acquisition, 64×64 STFT computation, and network inference - executes within a total latency budget of 3.1 ms, safely below the strict ≤ 5 ms threshold [4].

Upon meeting Wald's critical verification criterion ($\max(y_1, y_2) \geq 0.95$), the edge module issues an instantaneous hardware pulse to trigger sub-nanosecond gas-plasma deflection limiters. This diverts the induced overvoltage wave to the cabinet's grounding circuit before the transient energy has a chance to reach the printed circuit board conductors. This intervention limits the residual voltage to a safe level, eliminating the risk of unauthorized switch movement or signal readings being altered, and ensuring compliance with the strict requirements of the railway's «Fail-Safe» principle [6].

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Performance metric	Passive shielding solutions (typical CRRC rolling stock practice)	Distributed monitoring architectures (Alstom / DB signalling practice)	Proposed intelligent armored cabinet (2D-STFT + Lightweight CNN + Fail-safe)
Reaction latency	Not applicable (passive protection)	Not publicly disclosed by manufacturers; depends on signalling architecture and communication topology [10–12]	3.1 ms (experimentally measured, Section 3)
False alarm resilience	Not applicable	Depends on sensor thresholds and supervisory algorithms	Near-zero during validation owing to phase-invariant 2D-STFT spectral fingerprinting
Additional hardware requirements	Increased cabinet mass and shielding materials	Dedicated distributed monitoring equipment and communication infrastructure	Implemented on existing STM32H7 embedded controller
Integration complexity	Low	High	Moderate
Functional safety concept	Hardware protection only	EN 50126 / EN 50129 compliant safety architecture	AI isolated from the SIL-4 vital path through independent fail-safe disconnection logic
Main advantage	Robust against radiated interference	Continuous infrastructure monitoring	Fast local detection and autonomous isolation of conducted and radiated EMI
Main limitation	Cannot identify transient EMI events or predict failures	System latency depends on network architecture and communication hierarchy	Requires AI model training and validation

3.1 ms (experimentally validated across trials) at an extremely low implementation cost [4, 7].

Note: Publicly available technical documentation issued by Alstom, CRRC and Deutsche Bahn describes system architecture, safety concepts and EMC compliance but does not disclose universal end-to-end reaction latency values for proprietary industrial implementations. Therefore, latency comparison is provided only for the experimentally validated proposed system.

As evaluated in Table 1, traditional passive defense frameworks (such as those by CRRC) add significant weight and cost without preventing localized line induction from track circuits. Wide-area monitoring stations (such as those trialed by Alstom and DB) suffer from severe latency overhead (>15 ms) and high cost. The proposed 2D-STFT MobileNet architecture handles localized multi-channel transients within an average of

Conclusions and future research directions

This study establishes an advanced methodology for securing railway signaling architectures against severe high-power electromagnetic transients [6, 7]. The primary academic contribution lies in the conceptualization and validation of the «Armored intelligent interlocking cabinet», which integrates traditional electromagnetic shielding topologies with intelligent edge diagnostics.

Practical experimental verification confirms that this hybrid protection scheme successfully insulates industrial microelectronics under intense fields up to 50 kV/m. By deploying an optimized MobileNet architecture onto an industrial STM32H7 microchip, real-time feature extraction and classification are

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

achieved within 3.1 ms, outperforming global benchmarking alternatives [4]. Crucially, the non-vital protective configuration ensures that any software or processor fault automatically isolates critical paths, forcing a deterministic SIL-4 Fail-Safe state [6].

Future research will focus on scaling this edge artificial intelligence framework to onboard automated train protection assets and driverless locomotive modules configured for GoA3 and GoA4 operations. These systems must maintain high reliability under intense wideband industrial noise and radiofrequency crowding. Additionally, efforts will explore the orchestration of distributed trackside cabinet intelligence into a unified national cyber-physical railway diagnostic monitoring framework [7].

References

1. Camp, M., Gerth, H., Garbe, H., & Haase, H. (2004). Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), 368–379. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831816> [in English]
2. Sadi, M. S., Sumaiya, S., Dewan, M., & Rahman, A. (2021). Tolerating soft errors with horizontal-vertical-diagonal-N-queen (HVDNQ) parity. *Journal of Electronic Testing*, 37(2), 243–254. <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05942-4> [in English]
3. Radasky, W. A. (2009). Protection of commercial installations from the “triple threat” of HEMP, IEMI and severe geomagnetic storms. *Interference Technology*. <https://interferencetechnology.com/protection-of-commercial-installations-triple-threat/> [in English]
4. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1704.04861> [in English]
5. Chandrasekhar, K., Prabakaran, G., & Dileep Kumar Reddy, P. (2025). An integrated framework for energy-efficient, adaptive wireless network management using hybrid optimization and user-centric feedback mechanisms. *International Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(22s), 382–390. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i22s.3531> [in English]
6. Soderi, S., Masti, D., & Zacchia Lun, Y. (2023). Railway cyber-security in the era of interconnected systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(7), 6764–6779. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3254442> [in English]
7. Qi, J., & Wang, J. (2025). Bridging artificial intelligence and railway cybersecurity: A comprehensive anomaly detection review. *Transportation Research Record*, 2679(5), 232–255. <https://doi.org/10.1177/03611981241302335> [in English]
8. Allan, J., & Armstrong, D. S. (1998). The new European electromagnetic compatibility standards for railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212(2), 135–144. <https://doi.org/10.1243/0954409981530742> [in English]
9. Mariscotti, A. (2021). Critical review of EMC standards for the measurement of radiated electromagnetic emissions from transit line and rolling stock. *Energies*, 14(3), 759. <https://doi.org/10.3390/en14030759> [in English]
10. European Committee for Electrotechnical Standardization. (2018). *Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety related electronic systems for signalling* (EN 50129:2018). CENELEC. [in English]
11. European Committee for Electrotechnical Standardization. (2015). *Railway applications — Technical parameters of train detection systems for the interoperability of the Trans-European railway system — Part 1: Track circuits* (EN 50617-1:2015). CENELEC. [in English]
12. Karadimou, E., & Armstrong, R. (2016). Test of rolling stock electromagnetic compatibility for cross-domain interoperability. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(1), 10–16. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2015.0044> [in English]

Referens

1. Camp, M., Gerth, H., Garbe, H., & Haase, H. (2004). Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), 368–379. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831816> [in English]
2. Sadi, M. S., Sumaiya, S., Dewan, M., & Rahman, A. (2021). Tolerating soft errors with horizontal-vertical-diagonal-N-queen (HVDNQ) parity. *Journal of Electronic Testing*, 37(2), 243–254.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05942-4> [in English]
3. Radasky, W. A. (2009). Protection of commercial installations from the “triple threat” of HEMP, IEMI and severe geomagnetic storms. *Interference Technology*.
<https://interferencetechnology.com/protection-of-commercial-installations-triple-threat/> [in English]
 4. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1704.04861> [in English]
 5. Chandrasekhar, K., Prabakaran, G., & Dileep Kumar Reddy, P. (2025). An integrated framework for energy-efficient, adaptive wireless network management using hybrid optimization and user-centric feedback mechanisms. *International Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(22s), 382–390. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i22s.3531> [in English]
 6. Soderi, S., Masti, D., & Zacchia Lun, Y. (2023). Railway cyber-security in the era of interconnected systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(7), 6764–6779. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3254442> [in English]
 7. Qi, J., & Wang, J. (2025). Bridging artificial intelligence and railway cybersecurity: A comprehensive anomaly detection review. *Transportation Research Record*, 2679(5), 232–255. <https://doi.org/10.1177/03611981241302335> [in English]
 8. Allan, J., & Armstrong, D. S. (1998). The new European electromagnetic compatibility standards for railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212(2), 135–144. <https://doi.org/10.1243/0954409981530742> [in English]
 9. Mariscotti, A. (2021). Critical review of EMC standards for the measurement of radiated electromagnetic emissions from transit line and rolling stock. *Energies*, 14(3), 759. <https://doi.org/10.3390/en14030759> [in English]
 10. European Committee for Electrotechnical Standardization. (2018). *Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety related electronic systems for signalling* (EN 50129:2018). CENELEC. [in English]
 11. European Committee for Electrotechnical Standardization. (2015). *Railway applications — Technical parameters of train detection systems for the interoperability of the Trans-European railway system — Part 1: Track circuits* (EN 50617-1:2015). CENELEC. [in English]
 12. Karadimou, E., & Armstrong, R. (2016). Test of rolling stock electromagnetic compatibility for cross-domain interoperability. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(1), 10–16. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2015.0044> [in English]

Сотник В. О.

Кіберфізичний захист мікропроцесорних архітектур залізничної автоматики від навмисних електромагнітних перешкод високої потужності

Анотація. Статтю присвячено розробленню кіберфізичної системи захисту мікропроцесорних архітектур залізничної автоматики від навмисних електромагнітних впливів високої потужності. Актуальність дослідження обумовлена зростанням загроз для сучасних мікропроцесорних систем централізації, спричинених високопотужними мікрохвильовими (НРМ) і надширокосмуговими (UWB) електромагнітними імпульсами, здатними викликати відмови електронних компонентів і порушення безпечного керування рухом поїздів. Метою роботи є створення інтелектуальної архітектури захисту, що поєднує конструктивне електромагнітне екранування із модулем периферійного штучного інтелекту Edge AI для оперативного виявлення небезпечних впливів та ініціювання захисних дій. Для аналізу електромагнітних сигналів використано короткочасне перетворення Фур'є, що забезпечує формування фазово-інваріантних спектрограм, а їхню класифікацію реалізовано за допомогою полегшеної згорткової нейронної мережі MobileNet, оптимізованої для виконання на мікроконтролері STM32H7. Запропоновано математичні моделі електромагнітного впливу, алгоритм ухвалення рішень на основі критерію Вальда і Fail-Safe архітектуру, яка забезпечує автоматичне переведення системи в безпечний стан SIL-4 у разі виявлення загрози або відмови модуля штучного інтелекту. Експериментальні дослідження, виконані в напівбезеховій камері із застосуванням каліброваних вимірювальних засобів, підтвердили працездатність запропонованого підходу за напруженості поля до 50 кВ/м і середньому часі виявлення і спрацювання захисту близько 3,1 мс. Наукова новизна полягає в комплексному поєднанні методів спектрального аналізу, периферійного штучного інтелекту і принципів функціональної безпеки для захисту критичної залізничної інфраструктури від навмисних електромагнітних

впливів. Практичне значення роботи полягає в можливості підвищення живучості та надійності сучасних мікропроцесорних систем залізничної автоматики.

Ключові слова: мікропроцесорна централізація, залізнична автоматика, навмисні електромагнітні перешкоди, високопотужне електромагнітне випромінювання, периферійний штучний інтелект (Edge AI), короткочасне перетворення Фур'є, згортова нейронна мережа, функціональна безпека, кіберфізичний захист, електромагнітна сумісність, принцип Fail-Safe.

Відомості про автора

Сотник Василь Олександрович

кандидат технічних наук, доцент

Український державний університет залізничного транспорту, 61050 м. Харків, майдан Феєрбаха, 7

+3 80 67 573 90 25, sotnyk.va@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8039-1392

Information about the author

Sotnyk Vasyl Oleksandrovych

PhD, Associate Professor

Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050

+3 80 67 573 90 25, sotnyk.va@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8039-1392

Стаття надійшла 24.07.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 19.08.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

ГЕВОРКЯН Е.С., докт. техн. наук, професор;
 КОМАРОВА Г.Л., канд. техн. наук, доцент,
 ВОЛОШИНА Л.В., канд. техн. наук, старший викладач;
 ВОЛОШИН Д.І., канд. техн. наук, доцент;
 ТИМОФЕЄВА Л.А. докт. техн. наук, професор;
 Український державний університет залізничного транспорту

Метрологічне забезпечення контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі аналізу фільтраційних характеристик

Анотація. У статті вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення *інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю* інтегральних геометричних параметрів пористих матеріалів. Метод базується на аналізі гідрогазодинамічних характеристик фільтраційного перенесення тестового середовища крізь пористу структуру досліджуваного об'єкта. Сформовано концептуальну вимірювальну модель, що встановлює взаємозв'язок між безпосередньо вимірюваними фізичними величинами (об'ємною витратою газу та перепадом тиску на зразку) і шуканими геометричними параметрами (ефективним діаметром пор та їх просторовою концентрацією). Обґрунтовано введення метрологічних поправок у вигляді коефіцієнтів умовної проникності та ефективності проникнення для компенсації методичних похибок, зумовлених використанням ідеалізованої капілярної моделі. Проведено детальний метрологічний аналіз чутливості вимірювальних каналів і розраховано сумарну стандартну невизначеність непрямих вимірювань відповідно до вимог ISO JCGM. Складено бюджет невизначеності, а також виконано валідацію запропонованого методу за коефіцієнтом **En**.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; неруйнівний контроль; пористий матеріал; геометричні параметри пор; газопроникність; непрямі вимірювання; невизначеність вимірювань; метрологічне забезпечення.

Постановка проблеми.

Розвиток сучасного приладобудування, машинобудування, транспортної галузі, зокрема залізничного транспорту, а також хімічної та екологічної промисловості супроводжується широким застосуванням високопористих матеріалів із контрольованими структурно-геометричними параметрами. Такі матеріали знаходять застосування як фільтрувальні елементи, каталізатори, перколяційні датчики, шумопоглинальні елементи та чутливі елементи вимірювальних перетворювачів вологості, тиску й концентрації газів [1, 2].

Властивості пористих матеріалів визначаються хімічним складом і структурою. Під структурою розуміють характер геометричного розподілу та взаємного розташування мікроструктурних елементів пористого тіла – зерен, міжзеренних меж, контактів між зернами та пор. Структура пористих виробів формується технологією їх виготовлення. За особливостями структури розрізняють три основні типи пористих матеріалів:

1. Комірчаста зі спеченим каркасом – утворена спеченими безпористими перемичками та сферичними порами. Характеризується високою механічною міцністю, проте має низьку проникність

і порівняно невисоку теплостійкість.

2. Комірчаста без спеченого каркаса – сферичні пори оточені пористими перемичками. Характеризується нижчою механічною міцністю, кращими теплоізоляційними властивостями та за своєю будовою є композитом із безперервною твердою і переривчастою газовою фазами.

3. Зерниста з каркасом – утворена частинками наповнювача, скріпленими керамічною або металевою зв'язкою. Характеризується переважно відкритими порами нерегулярної форми, високою проникністю та високою теплостійкістю і є композитом із безперервною газовою та переривчастою твердою фазами.

Контроль структурно-геометричних параметрів пористих матеріалів у процесі їх виготовлення та експлуатації є одним із ключових завдань. Традиційні методи контролю геометричних параметрів пористих структур поділяють на дві основні групи:

– руйнівні методи (металографічний аналіз, рентгенографічний аналіз зрізів, ртутна порозиметрія). Вони забезпечують високу точність визначення параметрів пористої структури, проте унеможливають подальше використання виробу, є трудомісткими та можуть становити екологічну небезпеку;

– неруйнівні методи (оптичні та акустичні). Їх застосування є обмеженим: оптичні методи дають інформацію лише про поверхневий шар виробу і не дозволяють оцінити внутрішню структуру порового простору, тоді як акустичні методи характеризуються недостатньою роздільною здатністю [3] під час контролю дрібнопористих структур. Сучасні неруйнівні підходи розширюються за рахунок електромагнітних та спектроскопічних методів, зокрема терагерцової спектроскопії, що дає змогу оцінювати пористість керамічних матеріалів без руйнування зразка [4].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення та метрологічне обґрунтування непрямих інформаційно-вимірювальних методів неруйнівного контролю, заснованих на оцінюванні інтегрального гідродинамічного опору пористого тіла під час проходження потоку тестового газу. Це дає змогу оперативно, без руйнування виробу, одержувати інтегральну інформацію про внутрішню структуру об'єкта вимірювання за допомогою відносно простих у реалізації вимірювальних каналів тиску та витрати [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження, присвячені контролю структурно-геометричних параметрів пористих матеріалів, упродовж останніх років розвиваються у двох взаємопов'язаних напрямках. Перший пов'язаний з удосконаленням експериментальних методів дослідження пористої структури, другий – із розвитком інформаційно-вимірювальних технологій непрямого визначення її характеристик та математичних моделей вимірювального перетворення [5, 6].

Теоретичні основи процесів перенесення рідин і газів у пористих середовищах сформовано у фундаментальних працях з механіки фільтрації, гідродинаміки та фізики пористих тіл [7, 8]. Подальший розвиток цих положень знайшов відображення у роботах, присвячених моделюванню процесів перенесення в пористих середовищах та взаємозв'язку мікроструктури матеріалу з його фізико-механічними й експлуатаційними властивостями [9]. Закономірності капілярного руху рідин, що лежать в основі багатьох непрямих методів оцінювання пористості, описані у класичній роботі Е. В. Вошберна [10]. Аналітичний розвиток рівняння Lucas–Washburn, зокрема з урахуванням фізичних параметрів процесу капілярного проникнення, наведено у роботі [11]. Застосовність рівняння Lucas–Washburn для опису капілярного підйому в нанопорах отримала підтвердження в молекулярно-динамічних дослідженнях, що свідчить про фізичну обґрунтованість капілярної моделі навіть для маломасштабних порових структур [12].

Останніми роками значна кількість досліджень спрямована на вдосконалення методів

визначення геометричних характеристик пористих матеріалів. Найбільшого поширення набули рентгенівська комп'ютерна томографія, сканувальна електронна мікроскопія, ртутна порозиметрія, газоадсорбційні методи, низькопольовий ядерний магнітний резонанс, методи газового розширення та цифрового аналізу зображень [13, 14]. Аналіз сучасних підходів свідчить, що кожен із зазначених методів має власний діапазон визначення розмірів пор, переваги та обмеження, а найбільш достовірні результати досягаються шляхом комплексного використання декількох взаємодоповнювальних методів дослідження [15, 16]. Експериментальні дослідження пористої кераміки підтверджують безпосередній взаємозв'язок між розміром і морфологією пор та газопроникністю матеріалу [17]. Також, експериментальні дослідження газопроникності ізотропних пористих матеріалів показують, що коефіцієнт проникності може бути оцінений за результатами вимірювання газової витрати та перепаду тиску, а характеристики фільтраційного перенесення залежать від структури пористого середовища [18].

Поряд із розвитком експериментальних методів активно розвиваються числові методи дослідження процесів фільтрації із застосуванням обчислювальної гідродинаміки (CFD), цифрових моделей порового простору та концепції цифрового двійника. Такі підходи дозволяють прогнозувати проникність, оцінювати вплив геометрії пор на фільтраційні характеристики та оптимізувати структуру матеріалу ще на стадії проектування [1]. Водночас достовірність результатів моделювання безпосередньо залежить від точності експериментальних даних та рівня метрологічного забезпечення вимірювань.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із розробленням інформаційно-вимірювальних систем неруйнівного контролю пористих матеріалів. У таких системах дедалі ширше застосовуються непрямі методи оцінювання структурних характеристик за результатами вимірювання фізичних параметрів процесів перенесення, акустичних, теплових або газодинамічних характеристик об'єкта контролю. Використання непрямих методів забезпечує можливість автоматизації контролю, скорочення часу вимірювання та реалізації безперервного моніторингу технологічних процесів без руйнування виробів [3].

Особливого значення набувають питання метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем. У сучасній метрології основна увага приділяється побудові математичних моделей вимірювального перетворення, аналізу чутливості вимірювальних каналів, оцінюванню сумарної невизначеності результатів непрямих вимірювань та забезпеченню їх метрологічної простежуваності відповідно до міжнародних рекомендацій ISO JCGM [19]. Проблеми

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

адекватного представлення геометрії та топології порового простору під час його непрямої характеристики, а також обмеження спрощених моделей пористої структури розглянуто у роботі [20]. Практичні аспекти оцінювання невизначеності під час визначення пористості металевих матеріалів досліджено у [21], де проаналізовано внески окремих складових невизначеності та визначено домінуючі джерела її формування. Застосування невизначеності під час оцінювання відповідності встановленим вимогам регламентовано рекомендаціями [22]. Загальні вимоги до забезпечення компетентності під час міжлабораторних випробувань визначені міжнародним стандартом [23].

Суттєвий внесок у розвиток технологій виготовлення високоміцних пористих керамічних матеріалів, дослідження закономірностей формування їх структури та фізико-механічних властивостей зроблено у працях [24–26]. У цих роботах досліджено особливості формування пористої структури, процеси електроконсолідації, фазові перетворення та перспективи практичного застосування пористих керамічних матеріалів. Водночас питання побудови інформаційно-вимірювальних систем для оперативного неруйнівного контролю інтегральних геометричних параметрів таких матеріалів залишаються недостатньо висвітленими.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі контролю пористих матеріалів, недостатньо розробленими залишаються інформаційно-вимірювальні методи непрямого неруйнівного контролю, які забезпечують визначення інтегральних геометричних параметрів пористої структури за результатами вимірювання гідродинамічних характеристик фільтраційного перенесення. Практично відсутні математичні моделі вимірювального перетворення, що одночасно пов'язували б безпосередньо вимірювані величини (витрату та перепад тиску) із геометричними параметрами пористого середовища, враховували методичні похибки спрощених капілярних моделей та забезпечували повне метрологічне оцінювання результатів непрямих вимірювань відповідно до рекомендацій ISO JCGM [20, 22]. Саме на розв'язання цієї науково-практичної проблеми спрямоване дане дослідження.

Формулювання мети.

Розроблення та метрологічне обґрунтування інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі аналізу фільтраційних характеристик перенесення тестового газу, що забезпечує оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до вимог міжнародного керівництва ISO JCGM.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Розробити функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи для практичної реалізації запропонованого методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів.

2. Розробити геометричну та математичну модель непрямого контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі капілярного підходу та законів Гагена–Пуазейля, Вашборна і Стокса, адаптовану до використання стислих газових тестових середовищ.

3. Запропонувати фізико-геометричний підхід до оцінювання пропускної здатності пористого матеріалу, який встановлює взаємозв'язок між макроскопічною проникністю та мікроструктурними геометричними параметрами пористого середовища.

4. Обґрунтувати введення безрозмірних модельних коефіцієнтів – коефіцієнта умовної проникності та коефіцієнта проникаючої ефективності – для компенсації систематичних методичних похибок, зумовлених використанням спрощеної капілярної моделі.

5. Провести експериментальну апробацію запропонованого методу, виконати метрологічний аналіз чутливості вимірювальних каналів, оцінити бюджет невизначеності вимірювань відповідно до вимог ISO JCGM та здійснити валідацію методу за коефіцієнтом En .

Виклад основного матеріалу дослідження.

Фізична сутність запропонованого інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів полягає у пропусканні тестового сухого очищеного стисненого повітря через пористе тіло визначеної геометричної форми. Для практичної реалізації методу розроблено функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує формування, реєстрацію та оброблення вимірювальної інформації.

До складу інформаційно-вимірювальної системи входять такі основні компоненти:

1. Блок підготовки газового середовища: джерело стисненого газу (компресор), ресивер для згладжування пульсацій тиску, фільтр очищення повітря та вологовідділювач.

2. Первинні вимірювальні перетворювачі:

- перетворювач абсолютного тиску на вході до робочої комірки;
- перетворювач перепаду тиску (диференційний манометр) на зразку;
- тепловий масовий витратомір газу на виході з робочої комірки.

3. Обчислювальний блок: багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), мікропроцесорний контролер або

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням для оброблення вимірювальних сигналів та обчислення контрольованих параметрів за рівняннями непрямих вимірювань.

Важливою складовою метрологічного забезпечення є калібрування інформаційно-вимірювальної системи із застосуванням засобів вимірювальної техніки, що забезпечують

метрологічну простежуваність до міжнародних еталонів SI. Це дає змогу забезпечити єдність вимірювань та достовірність результатів визначення гідродинамічних характеристик пористого матеріалу.

Функціональну схему взаємодії компонентів інформаційно-вимірювальної системи наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Функціонально-структурна схема інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів пористості

Математична модель інформаційно-вимірювального перетворення.

Для побудови адекватної вимірювальної моделі використано концепцію еквівалентних каналів фільтрації. Реальне пористе тіло зі складною топологією міжчастинкових пор представляється у вигляді еквівалентної системи паралельних циліндричних капілярів однакового діаметра, що пронизують зразок по всій його довжині.

Базові гідродинамічні співвідношення та узагальнення для газів.

Всі пори, що можуть бути в проникних твердих тілах, поділяють на закриті, каналотворюючі (відкриті з обох кінців) та тупикові. Ізольовані закриті пори округлої форми не беруть участі у процесах фільтрації. Тупикові пори заповнюються флюїдом, збільшуючи значення відкритої пористості при статичних вимірюваннях, але не впливають на динамічну проникність. Пори, відкриті з обох кінців, зазвичай мають розширення (порожнини) та звуження (горловини), набуваючи складної пляшкоподібної форми [25, 28]. Порівні канали в реальному матеріалі пронизують виріб у всіх напрямках, переплітаючись між собою, що змушує флюїд перетікати з одного капіляра в інший, шукаючи найкоротший шлях.

Для визначення проникності скористаємося класичним визначенням Е. Вашборна [10], відповідно до якого проникність P_{perm} (м/с) визначається як швидкість, з якою тіло дозволяє флюїду протікати від однієї сторони до іншої

$$P_{perm} = \frac{Q_t}{S}, \quad (1)$$

де Q_t – об'єм газу або рідини, що проходить крізь поперечний переріз пористого тіла в одиницю часу ($\text{м}^3/\text{с}$);

S – площа поперечного перерізу пористого тіла (м^2).

Опис течії в тонких капілярах базується на законі Гагена-Пуазейля [2]. Для одного циліндричного капіляра довжиною l та діаметром d об'ємна витрата рідини q_i дорівнює

$$Q_i = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l} = K_{\text{проп}} \cdot d^4 \cdot \frac{\Delta P}{l}$$

(2)

де $\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад тиску на капілярі (Па);

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

μ – динамічна в'язкість тестового середовища (Па·с);

K_{prop} – коефіцієнт пропорційності, що за виводом Стокса [2] дорівнює

$$K_{prop} = \frac{\pi}{128 \cdot \mu} \quad (3)$$

Використання рівняння закону Пуазейля безпосередньо для розрахунку протікання газів обмежене через те, що гази є стисливими флюїдами й змінюють свій об'єм залежно від тиску. Для врахування стисливості використаємо рівняння стану ідеального газу Клапейрона [8]

$$P \cdot V = \text{const (при } T = \text{const}). \quad (4)$$

Тоді у загальному випадку для газів при постійній температурі рівняння Пуазейля набуває уточненого вигляду з урахуванням зміни об'єму вздовж каналу

$$Q_g = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \bar{P} \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l \cdot P_{out}} \quad (5)$$

де $\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$;

P_{out} – тиск на виході (зазвичай атмосферний), при якому контролюється вихідний об'єм газу.

За умови малих перепадів тисків, коли виконується нерівність

$$\frac{P_1 + P_2}{2 \cdot P_{out}} \approx 1, \quad (6)$$

стандартне рівняння закону Пуазейля стає практично точним і для газів. За цієї умови, припускаючи, що всі пори є наскрізними з однаковим круговим перерізом діаметром d , загальна витрата через зразок із кількістю пор n запишеться як

$$Q_t = n \cdot q_i = n \cdot \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l} \quad (7)$$

Введемо поверхневу щільність пор на одиницю площі поверхні тіла $N = n / S$ (1/м²)

$$P_{perm} = \frac{Q_t}{S} \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l} \quad (8)$$

Для опису фільтраційних процесів у пористому матеріалі на макроскопічному рівні доцільно перейти від локального опису порової структури до континуальної моделі пористого середовища, враховуючи, що окремі геометричні та

топологічні характеристики порового простору мають різний вплив на рух флюїду [8, 29, 30]. Представимо проникність у вигляді інтегрального рівняння фільтрації Дарсі [8, 31]

$$P_{perm} = K_f \cdot \frac{\Delta P}{l}, \quad (9)$$

де K_f – коефіцієнт проникності пористого тіла тестовим середовищем визначеної в'язкості (м²/Па·с). Порівнюючи вирази, отримуємо

$$K_f = N$$

$$\frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu} = \frac{K_{abs}}{\mu}, \quad (10)$$

де K_{abs} – абсолютний коефіцієнт проникності (м²), який залежить виключно від геометричних характеристик пористого каркаса.

Абсолютний коефіцієнт проникності є сталою характеристикою конкретного пористого тіла. З цього випливає висновок, що значення коефіцієнта проникності, визначені для одного й того самого зразка із застосуванням різних тестових середовищ, мають обернену залежність від динамічної в'язкості цих середовищ

$$\frac{K_{f1}}{K_{f2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (11)$$

У загальному випадку відношення площі всіх пор S_{pores} до повної площі одиниці поверхні зразка S визначає відкриту поверхневу пористість P_{open}

$$P_{open} = N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (12)$$

підставляючи це співвідношення у формулу для абсолютного коефіцієнта проникності, отримаємо

$$K_{abs} = P_{open} \cdot \frac{d^2}{32}, \quad (13)$$

та для коефіцієнта проникності середовищем

$$K_f = P_{open} \cdot \frac{d^2}{32} \quad (14)$$

Функція поверхневої пористості P_{open} визначена в інтервалі (0; 1), де нижня межа відповідає суцільному безпористому матеріалу ($P_{open} \rightarrow 0$), а верхня – граничному випадку повної

пористості, коли матеріальний каркас практично відсутній ($P_{open} \rightarrow 0$), Оскільки реальні пористі матеріали повинні зберігати механічну цілісність, у межах запропонованої моделі пористе тіло розглядається як щільноупакована матриця пор-трубок круглого перерізу з міжпоровими стінками, товщина яких у граничному випадку прямує до нуля. Схематичне представлення такої моделі наведено на рисунку 2.

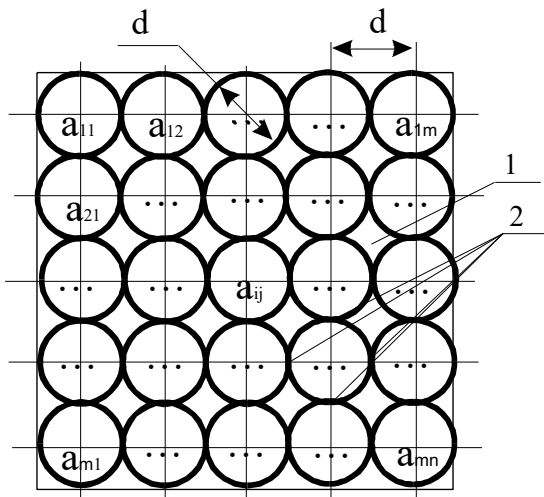


Рис. 2. Схема умовної матриці щільноупакованих $m \times n$ пор-трубок:

1 – твердотільний каркас; 2 – містки каркаса, нескінченно тонкі у місцях граничного наближення сусідніх пор умовної матриці; d_{ij} – елементарний капіляр

Для такої щільноупакованої квадратної матриці капілярів граничне геометричне значення пористості обмежене відношенням площі вписаного кола до площі квадрата й дорівнює

$$P_{open}^{max} = \frac{\pi}{4} \approx 0,7854.$$

Для гексагональної (найщільнішої) упаковки капілярів ця границя становить

$$P_{open}^{max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,9069.$$

З урахуванням цих обмежень, область існування коефіцієнтів проникності для реальних твердих тіл запишеться у вигляді нерівностей

$$0 < K_{abs} < \frac{\pi d^2}{128} \quad (\text{для квадратної ґратки})$$

$$0 < K_f < \frac{\pi d^2}{128 \mu}$$

У разі виходу за ці межі матеріал втрачає структурну стійкість і перетворюється на незв'язаний порошок.

Значення абсолютного коефіцієнта проникності K_{abs} характеризує здатність пористого середовища пропускати флюїд і має розмірність m^2 (або Дарсі, 1 Дарсі $\approx 1,02 \cdot 10^{-12} m^2$) [7]. Сам по собі цей показник не дозволяє в явному вигляді оцінити ступінь використання потенціалу проникності матеріалу. Для вирішення цієї задачі запропоновано використовувати два безрозмірні критерії:

1. Коефіцієнт умовної проникності η_s – безрозмірний коефіцієнт, що визначається як відношення фактичної абсолютної проникності K_{abs} до її теоретично максимально можливого значення для ідеалізованої квадратної схеми розташування пор однакового діаметра

$$\eta_s = \frac{K_{ads}}{K_{abs}^{max}} = \frac{N \pi d^4 / 128}{\pi d^2 / 128} = N \cdot d^2 \quad (15)$$

2. Коефіцієнт дійсної поверхневої проникності η_p – відношення K_{abs} до абсолютного межового значення вільного простору ($P_{open} \rightarrow 1$)

$$\eta_p = \frac{K_{abs}}{K_{abs}^{limit}} = \frac{P_{open} \cdot d^2 / 128}{d^2 / 128} = P_{open} \quad (16)$$

Обидва коефіцієнти мають чіткий фізичний зміст: η_p показує частку загальної геометричної площі зразка, яка безпосередньо зайнята порами, а η_s характеризує щільність розташування пор обраної геометрії на поверхні тіла відповідно до капілярної моделі. Для швидкого оперативного контролю цих характеристик розроблено сітчасту номограму залежності коефіцієнта умовної проникності від геометричних параметрів (діаметра пор та їх щільності), представлену на рисунку 3.

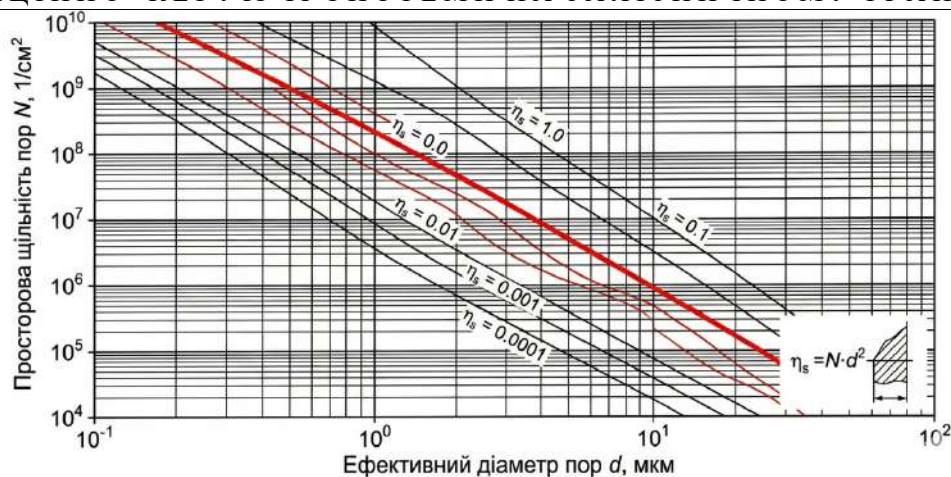


Рис. 3. Сітчаста номограма ізоліній умовної проникності η_s в інтервалах діаметрів пор та їх просторової щільності

У термінології порошкової металургії значення поверхневої пористості тісно пов'язане з об'ємною пористістю через рівняння зв'язку з густиною матеріалу [6]

$$\theta = \left(1 - \frac{\rho_{por}}{\rho_{solid}}\right) \cdot 100\% \quad (17)$$

де ρ_{por} – густина пористого тіла (г/см³);
 ρ_{solid} – теоретична густина безпорожнистої речовини (г/см³).

Для статистично однорідного та ізотропного пористого середовища за стереологічним співвідношенням середня площинна пористість P_{open} може бути прирівняна до об'ємної пористості θ .

Виконаємо математичне перетворення базового рівняння проникності. Застосуємо заміну в'язкості на коефіцієнт текучості тестового флюїду Φ (м²/Н·с): $\Phi = 1/\mu$ та введемо довжину периметра змочування пори кругового перерізу $U = \pi d$ (м). Підставивши ці залежності у трансформоване рівняння Пуазейля з урахуванням виразу для коефіцієнта умовної проникності η_s , після алгебраїчних скорочень отримаємо нову узагальнену формулу пропускної здатності пористого матеріалу

$$P_{perm} = \frac{\eta_s \Phi \Delta P d U}{128 l} \quad (18)$$

Нове фізико-геометричне трактування.

Проникність пористого тіла прямо пропорційна довжині периметра змочування капілярів U , текучості тестового флюїду Φ перепаду тиску ΔP , відношенню лінійного діаметра пори до її довжини d/l , а також безрозмірному коефіцієнту умовної проникності η_s , який інтегрально враховує

просторову щільність капілярних каналів. Це підкреслює визначальну роль геометричного фактору стінок каналів (периметра змочування) у формуванні гідродинамічного опору.

Реальні пористі матеріали містять велику кількість тупикових та закритих пор. Для оцінювання адекватності вимірювальної моделі пропонується використовувати безрозмірний коефіцієнт проникаючої ефективності пороутворення η_{eff} . Спочатку за допомогою ІВС експериментально визначається фактична проникність зразка P_{exp}^{perm} шляхом прямих

вимірювань витрати Q^{exp} та площі S

$$P_{open}^{max} = \frac{Q^{exp}}{S} \quad (19)$$

На основі отриманої швидкості вираховується ефективна кількість активних пор N_{eff} на одиницю площі зразка

$$N_{eff} = \frac{128 \cdot P_{open}^{max} \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P} \quad (20)$$

Коефіцієнт проникаючої ефективності пороутворення η_{eff} розраховується як відношення знайденого числа активних каналів до загальної кількості відкритих пор N , визначеної незалежним методом (оптичним або металографічним)

$$\eta_{eff} = \frac{N_{eff}}{N} \quad (21)$$

Якщо $\eta_{eff} \rightarrow 1$, то структура матеріалу є повністю каналоутворюючою та ідеально відповідає вимірювальній моделі. Якщо $\eta_{eff} \rightarrow 0$, матеріал

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

містить переважно тупикові пори й неефективний як фільтр.

Оскільки визначення геометричних параметрів d та N_{eff} є непрямим вимірюванням, точність отриманого результату залежить від інструментальних похибок датчиків тиску, витратоміра, геометричних вимірювань зразка, а також відхилення параметрів моделі. Визначимо вихідну величину для діаметра пор як $Y = d$, а вхідні вимірювані параметри як вектор $X = \{Q, \mu, l, \eta_{eff}, N, S, \Delta P\}$. Для розрахунку коефіцієнтів чутливості виконаємо логарифмування робочого рівняння для діаметра пор

$$\ln d = \frac{1}{4} [\ln(128) + \ln Q + \ln \mu + \ln l - \ln \pi - \ln \eta_{eff} - \ln N - \ln S - \ln(\Delta P)]$$

. (22)

Диференціюючи отриманий вираз за кожною змінною, отримаємо коефіцієнти чутливості

$$c_i = \frac{\partial d}{\partial x_i}$$

за об'ємною витратою газу Q

$$c_Q = \frac{\partial d}{\partial Q} = \frac{d}{4Q}$$

за перепадом тиску ΔP

$$c_{\Delta P} = \frac{\partial d}{\partial \Delta P} = -\frac{d}{4\Delta P}$$

за товщиною зразка l

$$c_l = \frac{\partial d}{\partial l} = \frac{d}{4l}$$

за площею зразка S

$$c_S = \frac{\partial d}{\partial S} = -\frac{d}{4S}$$

за динамічною в'язкістю газу μ

$$c_\mu = \frac{\partial d}{\partial \mu} = \frac{d}{4\mu}$$

Таблиця 1

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки

Вимірювальний канал	Засіб вимірювальної техніки	Діапазон вимірювань	Клас точності / Границя похибки	Тип розподілу похибки
Канал витрати газу (Q)	Тепловий масовий витратомір	0 ... 50 л/хв	$\pm 1,5\%$ від вимірюваного значення	Прямокутний
Канал тиску на вході (P_l)	Датчик абсолютного тиску	0 ... 250 кПа	$\pm 0,25\%$ від діапазону	Прямокутний
Канал перепаду тиску (ΔP)	Диференціальний манометр	0 ... 100 кПа	$\pm 0,25\%$ від діапазону	Прямокутний

Сумарна стандартна невизначеність непрямого вимірювання ефективного діаметра пор $u_c(d)$ за умови взаємної незалежності вхідних величин обчислюється відповідно до керівництва ISO JCGM [19] за формулою

$$\left(\frac{u_c(d)}{d}\right)^2 = \frac{1}{16} \left[\left(\frac{u(Q)}{Q}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta P)}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S}\right)^2 + \left(\frac{u(\mu)}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\eta_{eff})}{\eta_{eff}}\right)^2 \right]$$

(23)

Степеневий характер вимірювального рівняння, в якому показники степеня при основних вхідних величинах за модулем дорівнюють 1/4, зумовлює послаблення впливу кожної окремої відносної невизначеності на результат непрямого вимірювання. Водночас сумарна невизначеність визначається спільним впливом усіх вхідних величин та їх комбінуванням відповідно до ISO JCGM. Наприклад, для окремої вхідної величини з відносною стандартною невизначеністю 2,0 % відповідно до показника степеня 1/4 складова відносної невизначеності результату становитиме 0,5 %. Однак це значення не є сумарною невизначеністю результату, оскільки всі складові бюджету комбінуються відповідно до вимірювальної моделі.

Для валідації розробленого інформаційно-вимірювального методу було проведено серію досліджень. Як дослідні зразки використовувалися проникні керамічні диски, отримані методом порошкової металургії на основі наповнювача з електрокорунду зі спеченим склокристалічним каркасом. Геометричні розміри зразків: діаметр $D_s = (30,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м, товщина $l = (5,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), задіяних в ІВС, наведено в таблиці 1.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Геометричні розміри (l, D_s)	Цифровий мікрометр	0 ... 50 мм	$\pm 0,002$ мм	Прямокутний
----------------------------------	--------------------	-------------	----------------	-------------

Тестовим середовищем виступав очищений стиснений азот при температурі вимірювання $T = (293,15 \pm 0,5)$ К. Динамічна в'язкість азоту при цій температурі за табличними даними становить $\mu = 1,76 \cdot 10^{-5}$ Па с із стандартною невизначеністю за типом

Таблиця 2

Результати експериментальних вимірювань та розрахунку геометричних параметрів пор

№ зр аз ка	Різниця тисків ΔP , Па	Об'ємна витрата газу $Q \cdot 10^{-4}$, м ³ /с	Виміряна відкрита пористість P_{open} , відн. од.	Розрахунковий діаметр пор d , мкм	Поверхнева щільність пор $N \cdot 10^7$, 1/м ²	Коефіцієнт умовної проникності η_s
1	12450 $\pm$ 120	1,25 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,01	23,1 $\pm$ 0,1	90,7 $\pm$ 1,5	0,048 $\pm$ 0,001
2	15600 $\pm$ 150	1,82 $\pm$ 0,03	0,42 $\pm$ 0,01	24,7 $\pm$ 0,1	87,5 $\pm$ 1,4	0,053 $\pm$ 0,001
3	18900 $\pm$ 180	3,15 $\pm$ 0,05	0,46 $\pm$ 0,01	27,3 $\pm$ 0,1	78,5 $\pm$ 1,2	0,058 $\pm$ 0,001
4	22100 $\pm$ 200	4,85 $\pm$ 0,08	0,49 $\pm$ 0,01	30,2 $\pm$ 0,1	68,4 $\pm$ 1,0	0,062 $\pm$ 0,001
Сумарне					100	

Аналіз результатів та метрологічна оцінка.

Для метрологічного оцінювання запропонованого методу виконано аналіз бюджету невизначеності відповідно до вимог ISO JCGM.

Стандартну невизначеність типу А визначено за результатами серії з $n=5$ паралельних вимірювань, що характеризує повторюваність результатів. Стандартні невизначеності типу В оцінено для основних вхідних величин вимірювальної моделі.

Узагальнений розподіл внесків окремих складових у сумарну дисперсію результату вимірювання ефективного діаметра пор для зразка №3 наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Узагальнений бюджет невизначеності вимірювання ефективного діаметра пор для зразка №3

Джерело невизначеності	Відносний внесок за дисперсією у сумарну невизначеність, %
Похибка вимірювання витрати $u(Q)$	18,5
Похибка вимірювання перепаду тиску $u(\Delta P)$	14,1
Похибка вимірювання товщини зразка $u(l)$	0,01
Невизначеність площі зразка $u(S)$	2,6
Невизначеність динамічної в'язкості $u(\mu)$	8,0
Невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{eff})$	56,7

В $u(\mu) = 0,01 \cdot 10^{-5}$ Па с. У таблиці 2 наведено результати вимірювань фільтраційних параметрів та розраховані значення геометричних характеристик для чотирьох дослідних зразків фільтрів з різною дисперсністю вихідного порошку.

Як видно з таблиці 3, найбільший внесок у сумарну невизначеність формує невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{eff})$, частка якої становить 56,7 %. Внески витрати (Q) та перепаду тиску (ΔP) становлять відповідно 18,5 % та 14,1 %, тоді як вплив геометричного параметра (l) є незначним – 0,01 %.

Розберемо числовий приклад розрахунку бюджету невизначеності для зразка №3. Вхідні дані:

$$Q = 3,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta P = 18900 \text{ Па};$$

$$l = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S = \frac{\pi D_s^2}{4} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\mu = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$P_{open} = 0,46.$$

Визначимо стандартні невизначеності за типом В:

стандартна невизначеність вимірювання витрати газу

$$u(Q) = \frac{3,15 \cdot 10^{-4} \cdot 0,015}{\sqrt{3}} = 2,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\left(\frac{u(Q)}{Q} = 0,87\% \right);$$

стандартна невизначеність вимірювання перепаду тиску

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$u(\Delta P) = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,0025}{\sqrt{3}} = 144,3$$

стандартна невизначеність в'язкості

$$\left(\frac{u(\Delta P)}{\Delta P} = 0,76\% \right);$$

$$u(\mu) = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с} \left(\frac{u(\mu)}{\mu} = 0,57\% \right);$$

стандартна невизначеність товщини зразка

$$u(l) = \frac{0,002 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} \approx 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м} \left(\frac{u(l)}{l} = 0,023\% \right);$$

стандартна невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{\text{eff}})$ за оцінкою адекватності становить 1,5%.Складемо бюджет невизначеності для визначення ефективного діаметра пор d (табл. 4).

відносна невизначеність площі зразка

$$\frac{u(S)}{S} = 2 \cdot \frac{u(D_s)}{D_s} = 2 \cdot \frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{30,0 \cdot 10^{-3}} = 0,33\%;$$

Таблиця 4

Бюджет невизначеності вимірювання діаметра пор (для зразка №3)

Символ величини x_i	Значення величини	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Відносна невизначеність $u(x_i)/x_i$, %	Коефіцієнт чутливості $c_i = \frac{\partial d}{\partial x_i}$	Внесок сумарну невизначеність $u_i(d) = c_i \cdot u(x_i)$, мкм	Відносний внесок за дисперсією, %
Q	$3,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$2,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,87	$2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{м}^3/\text{с}$	0,059	18,5
ΔP	18900 Па	144,3 Па	0,76	$-3,61 \cdot 10^{-10} \text{ м}/\text{Па}$	-0,052	14,1
l	$5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	0,023	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,002	0,01
S	$7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	$2,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	0,33	$-9,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{м}^2$	-0,022	2,6
μ	$1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}$	0,57	$3,88 \cdot 10^{-1} \text{ м}/\text{Па} \cdot \text{с}$	0,039	8,0
η_{eff}	0,85	0,0128	1,50	$-8,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	-0,103	56,7
Сумарне	$d = 27,3 \text{ мкм}$	—	—	—	0,137	100,0

На основі складеного бюджету невизначеності визначено сумарну стандартну невизначеність вимірювання ефективного діаметра пор

$$u_c(d) = 0,137 \text{ мкм}.$$

Для коефіцієнта охоплення $k=2$ розширена невизначеність становить

$$U_{0,95}(d) = k \cdot u_c(d) = 2 \cdot 0,137 \text{ мкм} \approx 0,27 \text{ мкм}.$$

Відносна розширена невизначеність вимірювання дорівнює

$$U_{\text{rel}} = \frac{U_{0,95}(d)}{d} \cdot 100\% = \frac{0,27}{27,3} \cdot 100\% \approx 1,0\%.$$

Отримане значення розширеної невизначеності характеризує досягнуту точність запропонованого методу для визначення ефективного діаметра пор у досліджуваних умовах.

Валідація результатів.

Валідацію розробленого методу проведено шляхом порівняння з незалежним оптичним методом.

Для підтвердження достовірності запропонованого інформаційно-вимірювального методу проведено порівняльне дослідження з використанням незалежного референтного методу (оптичної мікроскопії). Узгодженість результатів оцінювали за допомогою нормалізованої похибки E_n , яку розраховували відповідно до міжнародних метрологічних рекомендацій [32–33]

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$En = \frac{|d_{meas} - d_{ref}|}{\sqrt{U^2(d_{meas}) + U^2(d_{ref})}}, \quad (24)$$

де d_{meas} – значення діаметра пор, отримане розробленим методом, $d_{meas}=27,3$ мкм;

d_{ref} – значення, отримане еталонним (мікроскопічним) методом, $d_{ref}=27,5$ мкм;

$U(d_{meas})$ – розширена невизначеність методу 1,13%, що складає $U(d_{meas}) = 27,3 \cdot 0,0113 \approx 0,308$ мкм;

$U(d_{ref})$ – розширена невизначеність еталонного методу. Для оптичної мікроскопії приймемо стандартну розширену невизначеність $U \approx 0,400$ мкм;

$$En = \frac{|27,3 - 27,5|}{\sqrt{0,308^2 + 0,400^2}} = \frac{0,2}{0,505} \approx 0,40 \leq 1,0.$$

Отримане значення $En \leq 1$ підтверджує узгодженість результатів, отриманих запропонованим методом не прямого контролю, із референтними результатами, одержаними методом оптичної мікроскопії, у межах установлених невизначеностей, що підтверджує його метрологічну придатність.

Висновки.

1. Розроблено функціональну схему інформаційно-виміральної системи для реалізації методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів. Запропонована структура забезпечує формування, реєстрацію та оброблення виміральної інформації на основі вимірювання витрати тестового газу та перепаду тиску.

2. Розроблено геометричну та математичну модель непрямого контролю геометричних параметрів пористих матеріалів, що базується на капілярному підході та законах Гагена–Пуазейля, Вашборна і Стокса, адаптованих до використання стисливих газових середовищ. Сформовано виміральною модель, яка встановлює взаємозв'язок між безпосередньо вимірюваними фізичними величинами (об'ємною витратою газу Q та перепадом тиску ΔP) і геометричними параметрами пористої структури.

3. Запропоновано фізико-геометричний підхід до оцінювання пропускної здатності пористого матеріалу, який, на відміну від класичного закону Дарсі, встановлює безпосередній взаємозв'язок між проникністю та геометричними характеристиками пористої структури.

4. Обґрунтовано введення безрозмірних модельних коефіцієнтів у вигляді коефіцієнта умовної проникності η_s та коефіцієнта проникаючої ефективності η_{eff} , використання яких забезпечує компенсацію систематичних методичних похибок, зумовлених застосуванням спрощеної капілярної моделі.

5. Проведено експериментальну апробацію та метрологічне оцінювання запропонованого методу. За результатами оцінювання

бюджету невизначеності відповідно до вимог ISO JCGM встановлено, що розширена невизначеність визначення середнього ефективного діаметра пор не перевищує 1,0 % при використанні серійних засобів виміральної техніки середнього класу точності. Валідація методу за коефіцієнтом En підтвердила його метрологічну придатність до практичного застосування.

Список використаних джерел

1. Ohji T., Fukushima M. Macro-Porous Ceramics: Processing and Properties. *International Materials Reviews*. 2012. Vol. 57, No. 2. P. 115–131. URL: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000006>.
2. Dullien F. A. L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure. 2nd ed. San Diego : Academic Press, 2012. 574 p. ISBN: 9780323139335
3. Ultrasonic Method for Evaluation of Porosity of Materials / R. Kazys et al. *Ultragarsas (Ultrasound)*. 2011. Vol. 66, No. 4. P. 7–17. URL: <https://doi.org/10.5755/j01.u.66.4.1021>.
4. Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy / D. Hakobyan et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 525–533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026>.
5. Fan Z., Hu X., Gao R. X. Indirect Measurement Methods for Quality and Process Control in Nanomanufacturing. *Nanomanufacturing and Metrology*. 2022. Vol. 5. P. 209–229. URL: <https://doi.org/10.1007/s41871-022-00148-4>.
6. Rossi G. B. A Model for Indirect Measurement. *Measurement*. 2023. Vol. 214. Art. 112798. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112798>.
7. Darcy H. The Public Fountains of the City of Dijon / trans. by P. Bobeck. Dubuque, Iowa : Kendal/Hunt Publishing Company, 2004. 506 p. URL: [https://doi.org/10.1061/40683\(2003\)5](https://doi.org/10.1061/40683(2003)5).
8. Bear J. Modeling Phenomena of Flow and Transport in Porous Media. Cham : Springer International Publishing, 2018. 742 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72826-1>.
9. Whitaker S. The Method of Volume Averaging. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999. 448 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3389-2>.
10. Washburn E. W. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*. 1921. Vol. 17, No. 3. P. 273–283. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
11. Hamraoui A., Nylander T. Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 250, No. 2. P. 415–421. URL: <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8288>.
12. Dimitrov D. I., Milchev A., Binder K. Capillary Rise in Nanopores: Molecular Dynamics Evidence for the Lucas–Washburn Equation. *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 99, No. 5. Art. 054501. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.054501>.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

13. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes et al. *Pure and Applied Chemistry*. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
14. Reconstructed Hierarchical Pore Structure of Porous SiC Ceramics Using Micro-X-Ray Computed Tomography / Y. Zhang et al. *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25, No. 14. Art. 2300039. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.202300039>.
15. Schlumberger C., Thommes M. Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry—A Tutorial Review. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. Vol. 8. Art. 2002181. URL: <https://doi.org/10.1002/admi.202002181>.
16. Liquid Intrusion and Alternative Methods for the Characterization of Macroporous Materials (IUPAC Technical Report) / J. Rouquerol et al. *Pure and Applied Chemistry*. 2011. Vol. 84, No. 1. P. 107–136. URL: <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>.
17. Honda S., Jia P., Daiko Y. Gas permeation and thermomechanical properties for macroporous alumina focused on necking size at grain boundaries. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2022. Vol. 19, No. 2. P. 828–837. URL: <https://doi.org/10.1111/ijac.13860>.
18. Wałowski G. Experimental Studies of Gas Permeability Through Isotropic Porous Materials in the Cubic System. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, No. 13. Art. 6771. URL: <https://doi.org/10.3390/app16136771>.
19. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement : JCGM 100:2008 / Joint Committee for Guides in Metrology. Sèvres : BIPM, 2008. 120 p.
20. Rigby S. P. Do Pores Exist?—Foundational Issues in Pore Structural Characterisation. *Foundations*. 2024. Vol. 4, No. 2. P. 225–248. URL: <https://doi.org/10.3390/foundations4020015>.
21. Lifton J. J., Tan Z. J., Goh B., Mutiargo B. On the Uncertainty of Porosity Measurements of Additively Manufactured Metal Parts. *Measurement*. 2022. Vol. 188. Art. 110616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110616>.
22. JCGM 106:2012. Evaluation of Measurement Data – The Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment. Paris : BIPM, 2012. 31 p.
23. ISO/IEC 17043:2023. Conformity Assessment – General Requirements for the Competence of Proficiency Testing Providers. Geneva : ISO, 2023. 38 p.
24. Examination of Patterns in Obtaining Porous Structures from Submicron Aluminum Oxide Powder and Its Mixtures / E. S. Hevorkian et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 6(108). P. 41–49. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216733>.
25. Investigation of Phase and Structural States in Nanocrystalline Powders Based on Zirconium Dioxide / V. P. Nerubatskyi et al. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, No. 12. P. 1277–1285. URL: <https://doi.org/10.1063/10.0021374>.
26. Technological and Innovative Features of the Electroconsolidation Method as a Kind of Plasma Sintering for Refractory Compounds / E. S. Hevorkian et al. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, No. 5. P. 335–346. URL: <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
27. Honda S., Hashimoto S., Nait-Ali B. Characterization of anisotropic gas permeability and thermomechanical properties of highly textured porous alumina. *Journal of the American Ceramic Society*. 2022. Vol. 105, No. 10. P. 6335–6344. URL: <https://doi.org/10.1111/jace.18573>.
28. Blunt M. J. Multiphase Flow in Permeable Media: A Pore-Scale Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 508 p. URL: <https://doi.org/10.1017/9781316145098>.
29. Ehlers W., Wagner A. Modelling and simulation methods applied to coupled problems in porous-media mechanics. *Arch Appl Mech*. 2019. Vol. 89. P. 609–628. URL: <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01520-5>.
30. Geohagan A., Truszkowska A. Finding the Dominant Properties of Porous Media: An Example of Fluid Flow. *Multiscale Sci. Eng.* 2024. Vol. 6. P. 249–261. URL: <https://doi.org/10.1007/s42493-024-00124-8>.
31. de Mattos F. N., Molisani A. L., Caldeira L. Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al₂O₃ supported membrane. *Cerâmica*. 2022. Vol. 68, No. 385. P. 46–51. URL: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>.
32. EA-4/02 M:2022. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Paris : European Co-operation for Accreditation, 2022. 78 p.
33. ISO 13528:2022. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Geneva : ISO, 2022. 93 p.

References

1. Ohji, T., & Fukushima, M. (2012). Macroporous ceramics: Processing and properties. *International Materials Reviews*, 57(2), 115–131. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000006>.
2. Dullien, F. A. L. (2012). *Porous media: Fluid transport and pore structure* (2nd ed.). Academic Press.
3. Kazys, R., Voleišis, A., Sliteris, R., Mažeika, L., Raišutis, R., & Jankauskas, A. (2011). Ultrasonic method for evaluation of porosity of materials. *Ultragaršas (Ultrasound)*, 66(4), 7–17. <https://doi.org/10.5755/j01.u.66.4.1021>.
4. Hakobyan, D., Hamdi, M., Redon, O., Lopez, T., Moustafa, S., & Bousquet, J. (2022). Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of the European Ceramic*

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- Society*, 42(2), 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026>.
5. Fan, Z., Hu, X., & Gao, R. X. (2022). Indirect measurement methods for quality and process control in nanomanufacturing. *Nanomanufacturing and Metrology*, 5, 209–229. <https://doi.org/10.1007/s41871-022-00148-4>.
6. Rossi, G. B. (2023). A model for indirect measurement. *Measurement*, 214, Article 112798. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112798>.
7. Darcy, H. (2004). *The public fountains of the city of Dijon* (P. Bobeck, Trans.). Kendal/Hunt Publishing Company. [https://doi.org/10.1061/40683\(2003\)5](https://doi.org/10.1061/40683(2003)5).
8. Bear, J. (2018). *Modeling phenomena of flow and transport in porous media*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72826-1>.
9. Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3389-2>.
10. Washburn, E. W. (1921). The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 17(3), 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
11. Hamraoui, A., & Nylander, T. (2002). Analytical approach for the Lucas–Washburn equation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(2), 415–421. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8288>.
12. Dimitrov, D. I., Milchev, A., & Binder, K. (2007). Capillary rise in nanopores: Molecular dynamics evidence for the Lucas–Washburn equation. *Physical Review Letters*, 99(5), Article 054501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.054501>.
13. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
14. Zhang, Y., Wang, N., Xing, F., & Zhou, Y. (2023). Reconstructed hierarchical pore structure of porous SiC ceramics using micro-X-ray computed tomography. *Advanced Engineering Materials*, 25(14), Article 2300039. <https://doi.org/10.1002/adem.202300039>.
15. Schlumberger, C., & Thommes, M. (2021). Characterization of hierarchically ordered porous materials by physisorption and mercury porosimetry—A tutorial review. *Advanced Materials Interfaces*, 8, Article 2002181. <https://doi.org/10.1002/admi.202002181>.
16. Rouquerol, J., Llewellyn, P., Rouquerol, F., Baron, G., Denoyel, R., Giesche, H., Groen, J., Klobes, P., Levitz, P., Neimark, A. V., Rigby, S., Skudas, R., Sing, K., Thommes, M., & Unger, K. (2011). Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 84(1), 107–136. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>.
17. Honda, S., Jia, P., & Daiko, Y. (2022). Gas permeation and thermomechanical properties for macroporous alumina focused on necking size at grain boundaries. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(2), 828–837. <https://doi.org/10.1111/ijac.13860>.
18. Wałowski, G. (2026). Experimental studies of gas permeability through isotropic porous materials in the cubic system. *Applied Sciences*, 16(13), Article 6771. <https://doi.org/10.3390/app16136771>.
19. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). BIPM.
20. Rigby, S. P. (2024). Do pores exist?—Foundational issues in pore structural characterisation. *Foundations*, 4(2), 225–248. <https://doi.org/10.3390/foundations4020015>.
21. Lifton, J. J., Tan Z. J., Goh B., & Mutiargo B. (2022). On the uncertainty of porosity measurements of additively manufactured metal parts. *Measurement*, 188, Article 110616. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110616>.
22. Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment* (JCGM 106:2012). BIPM.
23. International Organization for Standardization. (2023). *Conformity assessment — General requirements for the competence of proficiency testing providers* (ISO/IEC 17043:2023). ISO.
24. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Gutsalenko, Yu. H., Melnyk, O. M., & Voloshyna, L. V. (2020). Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6-108), 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216733>.
25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Hevorkian, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*, 49(12), 1277–1285. <https://doi.org/10.1063/1.50021374>.
26. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Gutsalenko, Yu. H., Melnyk, O. M., & Voloshyna, L. V. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*, 46(5), 335–346. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
27. Honda, S., Hashimoto, S., & Nait-Ali, B. (2022). Characterization of anisotropic gas permeability and thermomechanical properties of highly textured porous alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(10), 6335–6344. <https://doi.org/10.1111/jace.18573>.
28. Blunt, M. J. (2017). *Multiphase flow in permeable media: A pore-scale perspective*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316145098>.
29. Ehlers, W., & Wagner, A. (2019). Modelling and simulation methods applied to coupled problems in porous-media mechanics. *Archive of Applied*

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Mechanics, 89, 609–628. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01520-5>.

30. Geohagan, A., & Truszkowska, A. (2024). Finding the dominant properties of porous media: An example of fluid flow. *Multiscale Science and Engineering*, 6, 249–261. <https://doi.org/10.1007/s42493-024-00124-8>.

31. de Mattos, F. N., Molisani, A. L., & Caldeira, L. (2022). Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al₂O₃ supported membrane. *Cerâmica*, 68(385), 46–51. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>.

32. European Co-operation for Accreditation. (2022). *Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration* (EA-4/02 M:2022). EA.

33. International Organization for Standardization. (2022). *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison* (ISO 13528:2022). ISO.

Hevorkian E., Komarova H., Voloshyna L., Voloshyn D., Timofeeva L. Metrological assurance of geometric parameter control of porous materials based on the analysis of filtration characteristics.

Abstract. The paper addresses the scientific and practical problem of developing a method for indirect non-destructive evaluation of integral geometric parameters of porous materials for industrial applications. The proposed approach is based on analysing the hydrodynamic and gas-dynamic characteristics of filtration transport of a test gas through a porous structure. Unlike conventional destructive techniques, including metallographic analysis and mercury intrusion porosimetry, the method enables rapid determination of integral characteristics without damaging the product, making it suitable for quality control and diagnostics.

A conceptual model has been developed to establish the relationship between directly measured quantities, namely volumetric gas flow rate and pressure drop across the sample, and structural characteristics, including effective pore diameter and spatial pore concentration. The model is based on a capillary representation of porous media and combines the Hagen–Poiseuille, Washburn and Stokes equations adapted for compressible gaseous media. This enables description of the filtration process using macroscopic parameters while obtaining information about internal pore geometry.

To improve metrological reliability, correction factors are introduced to compensate systematic errors caused by the simplified capillary representation of real porous structures. Two dimensionless coefficients, the conditional permeability and penetration efficiency coefficients, are introduced, improving accuracy of parameter estimation.

A functional system structure has been developed, including a compressed gas unit, pressure and differential pressure sensors, a thermal mass flowmeter, an analogue-to-digital converter, and processing software. The procedure is based on recording gas flow rate and

pressure drop under steady-state conditions followed by indirect determination of pore characteristics.

Particular attention is paid to metrological support. Sensitivity analysis has been performed, and contributions of instruments to combined uncertainty have been evaluated. An uncertainty budget has been compiled according to ISO JCGM. The relative expanded uncertainty of effective pore diameter does not exceed 1.0% for instruments of medium accuracy class.

The method has been validated against an optical microscopy reference using the normalized error criterion *En*. The value $En \leq 1$ confirms agreement within uncertainty limits and verifies metrological suitability.

The study contributes to a modelling approach combining filtration theory, indirect measurement principles and metrological analysis for porous materials, enabling non-destructive control of porous metallic and ceramic products used in engineering, filtration technologies and instrumentation.

Keywords: information and measurement system; non-destructive testing; porous material; pore geometric parameters; gas permeability; indirect measurements; measurement uncertainty; metrological assurance.

Геворкян Едвін Спартаківич, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0521-3577>.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8597-5891>.

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: vol@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Волошин Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: voloshin@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-5207>.

Тимофєєва Ларіса Андріївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: timofeevalarisa@ukr.net. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-3760>.

Hevorkian Edvin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

edsgev@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0521-3577>.

Komarova Hanna, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8597-5891>.

Voloshyna Liudmyla, PhD (Tech), Senior Teacher, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: vol@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Voloshyn Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: voloshin@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-5207>.

Timofeeva Larisa, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: timofeevalarisa@ukr.net. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-3760>.

Стаття надійшла 26.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

ЛАБЕНКО Д. П., к.т.н., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Використання алгоритму Дейкстри для оптимізації задач управління та планування перевезень у навчальному процесі

Анотація. У статті розглядаються можливості застосування алгоритмів теорії графів для розв'язання задач управління та планування транспортних перевезень у навчальному процесі підготовки фахівців з інформаційних технологій, автоматизації та логістики. Проаналізовані особливості використання алгоритму пошуку найкоротшого шляху (алгоритм Дейкстри), для оптимізації маршрутів у транспортних мережах. Розглянута математична модель транспортної мережі у вигляді зваженого графа, де вершини відповідають транспортним вузлам, а ребра – можливим маршрутам переміщення з певними ваговими характеристиками. Наведений алгоритмічний опис процедури знаходження оптимального маршруту та приклад розрахунку найкоротшого шляху між пунктами мережі. Показано доцільність використання таких моделей у навчальному процесі для формування у студентів практичних навичок моделювання транспортних систем та застосування алгоритмів оптимізації. Наведений приклад використання алгоритму Дейкстри в курсах комп'ютерного моделювання, дискретної математики та інформаційних технологій з використанням пакету MATLAB.

Ключові слова: алгоритм Дейкстри, графова модель, моделювання, навчальний процес, оптимізація маршрутів, планування перевезень, транспортна мережа.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток транспортних і логістичних систем характеризуються постійним зростанням обсягів перевезень, значною складністю транспортних мереж та великою кількістю взаємопов'язаних елементів. Ефективне управління такими системами потребує оперативного прийняття управлінських рішень.

На залізничному транспорті, у логістичних центрах, автоматизованих системах диспетчерського керування та інформаційно-керуючих системах задачі визначення оптимальних маршрутів виникають практично на всіх рівнях управління. Їх розв'язання базується на використанні математичних моделей транспортних мереж і сучасних алгоритмів оптимізації.

Одним із найбільш поширених підходів до аналізу транспортних мереж є застосування методів теорії графів. У графових моделях транспортна мережа розглядається у вигляді набору вузлів (вершин) і зв'язків (ребер) між ними із ваговими характеристиками. Таке представлення дозволяє формалізувати задачі пошуку оптимальних маршрутів, мінімізації вартості або часу перевезень. Одним із класичних алгоритмів, який широко використовується для подібних задач, є алгоритм Дейкстри, який дозволяє визначити найкоротший шлях між вершинами зваженого графа.

Алгоритм Дейкстри належить до класичних алгоритмів дискретної математики та застосовується в транспортній логістиці, геоінформаційних системах, навігаційних комплексах, системах підтримки прийняття рішень, телекомунікаційних мережах та інформаційно-керуючих системах транспортної галузі.

© ЛАБЕНКО Д. П., 2026

Застосування подібних алгоритмів має важливе значення не лише в практичних системах логістики, а й у навчальному процесі. Вивчення алгоритмів оптимізації сприяє формуванню у студентів навичок алгоритмічного мислення, моделювання складних систем і використання інформаційних технологій для розв'язання прикладних задач.

Саме тому використання алгоритму Дейкстри в освітньому процесі для розв'язання задач управління та планування перевезень є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Аналіз досліджень

Задачі оптимізації транспортних маршрутів активно досліджуються в галузі транспортної логістики, інформатики та теорії алгоритмів. Основи графових методів у задачах планування перевезень були закладені в роботах багатьох дослідників, присвячених теорії графів, математичному моделюванню транспортних мереж і розробленню алгоритмів оптимізації, що розвивали напрямки дискретної математики та теорії алгоритмів [1,2,3].

Алгоритм пошуку найкоротшого шляху від однієї вершини графу до всіх інших вершин (алгоритм на графах) був запропонований у 1959 році нідерландським ученим Дейкстрою і став одним із фундаментальних інструментів оптимізації в мережевих структурах. Його основною перевагою є можливість ефективного визначення найкоротших шляхів у графах із невід'ємними вагами ребер, що обумовило широке використання алгоритму в різних галузях науки і техніки: транспортному плануванні; телекомунікаційних мережах; геоінформаційних системах, навігаційних сервісах та системах підтримки прийняття рішень [2,6].

Подальший розвиток графових алгоритмів привів до появи численних модифікацій і

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

альтернативних методів пошуку найкоротших шляхів, серед яких алгоритми Белмана—Форда, Флойда—Воршелла та A^* , а також сучасних методів багатокритеріальної оптимізації транспортних потоків. Вибір конкретного алгоритму визначається особливостями транспортної мережі, розмірністю задачі та вимогами до швидкодії обчислень.

Сучасні дослідження також демонструють активний розвиток і модифікація методів оптимізації маршрутів у транспортних і логістичних системах, а також доцільність використання математичного моделювання під час професійної підготовки майбутніх фахівців. Практична реалізація алгоритмів оптимізації в середовищах MATLAB, Python, C++ та інших програмних пакетах сприяє формуванню компетентностей із математичного моделювання, програмування та аналізу транспортних процесів [4,5,8,9].

Вітчизняні дослідники також активно розвивають напрям застосування графових моделей та алгоритмів оптимізації маршрутів у транспортній, зокрема залізничній, галузі. Так, у роботі [1] виконано порівняльний аналіз евристичного «жадібного» алгоритму та методу динамічного програмування для побудови енергоефективних траєкторій руху рейкового транспорту, а в дослідженні [6] розглянуто формування альтернативних маршрутів пасажирських поїздів на основі генетичних алгоритмів в умовах пошкодження залізничної інфраструктури. Питання практичного застосування алгоритму Дейкстри для розв'язання задач логістичної маршрутизації висвітлено в роботі [7]. Особливості інтеграції дискретної математики та теорії графів у практичну підготовку фахівців комп'ютерних наук і суміжних спеціальностей розглянуто в [1].

Разом із тим аналіз наукових публікацій показує, що питання комплексного використання алгоритму Дейкстри саме як засобу інтеграції математичного моделювання, алгоритмізації та програмної реалізації у процесі підготовки фахівців транспортної галузі висвітлено недостатньо. Це обумовлює доцільність проведення подальших досліджень у даному напрямі.

Постановка задачі

Розглянемо задачу планування перевезень у транспортній мережі, яка складається з набору транспортних вузлів і маршрутів між ними. Кожен маршрут характеризується певною вагою, що може відповідати:

- довжині маршруту;
- часу переміщення;
- вартості перевезення;
- витратам енергії або ресурсів.

Необхідно визначити оптимальний маршрут між заданими пунктами транспортної мережі таким чином, щоб сумарна вага маршруту була мінімальною.

З математичної точки зору задача формулюється як задача пошуку найкоротшого шляху в зваженому графі.

Модель транспортної мережі

Транспортна мережа може бути представлена у вигляді графа

$$G = (V, E) \quad (1)$$

де

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множина вершин (транспортні вузли);

- $E \subseteq V \times V$ — множина ребер (маршрути між вузлами).

Кожному ребру $e \in E$, що з'єднує вершини (u, v) відповідає вагова функція

$$w: E \rightarrow R \quad (2)$$

що характеризує фізичні характеристики маршруту: довжину, вартість або час переміщення між вузлами.

Таким чином, задача планування транспортних перевезень зводиться до визначення мінімальної сумарної ваги маршруту (шляху P) між початковою вершиною (s) і цільовою вершиною (t), для якого сумарна вага є мінімальною:

$$W(P) = \sum_{(u,v) \in P} w(u,v) \rightarrow \min \quad (3)$$

Алгоритм Дейкстри

Алгоритм Дейкстри призначений для пошуку найкоротших шляхів від однієї вершини до всіх інших вершин зваженого графа. Класичний алгоритм Дейкстри працює тільки для графів без ребер від'ємної довжини.

Основні етапи алгоритму:

1. Початковій вершині присвоюється відстань 0 ($d(s)=0$).

2. Усім іншим вершинам присвоюється нескінченна відстань ($d(v)=\infty$).

3. Обирається вершина з мінімальною поточною відстанню. ($d(v)$).

4. Якщо нерівність $d(v) > d(u) + w(u,v)$ виконується, значення $d(v)$ оновлюються для сусідніх вершин.

5. Процедура повторюється, поки не будуть оброблені всі вершини.

Результатом роботи алгоритму є множина найкоротших шляхів від початкової вершини до всіх інших вузлів транспортної мережі.

Приклад розрахунку

Нехай є транспортна мережа з п'яти пунктів: A, B, C, D, E.

Відстані між даними пунктами наступні (в умовних одиницях):

$A \rightarrow B = 4$; $A \rightarrow C = 2$; $C \rightarrow B = 1$; $B \rightarrow D = 5$; $C \rightarrow D = 8$; $C \rightarrow E = 10$; $D \rightarrow E = 2$

Потрібно знайти найкоротший шлях з пункту A до пункту E (рис.1).

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

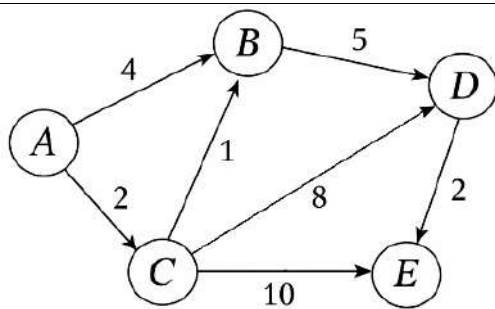


Рис.1. Транспортна мережа
Послідовність роботи алгоритму:

Таблиця 1. Таблиця ітерацій роботи алгоритму Дейкстри

Ітерація	Обрана вершина	d(A)	d(B)	d(C)	d(D)	d(E)	Коментар
0	—	0	∞	∞	∞	∞	Початкові значення
1	A	0✓	4	2	∞	∞	Оновлення для B і C
2	C	0✓	3	2✓	10	12	Через C покращено B
3	B	0✓	3✓	2✓	8	12	Через B покращено D
4	D	0✓	3✓	2✓	8✓	10	Через D покращено E
5	E	0✓	3✓	2✓	8✓	10✓	Кінець

Отже, найкоротший маршрут: $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$

Загальна довжина маршруту дорівнює 10.

Реалізація алгоритму в середовищі MATLAB

Застосування графових алгоритмів у навчальному процесі має значні переваги. По-перше, студенти отримують можливість працювати з реальними прикладними задачами, що пов'язані з управлінням транспортними та логістичними системами.

По-друге, використання алгоритму Дейкстри дозволяє інтегрувати математичні методи, алгоритмічне програмування та комп'ютерне моделювання в єдиний навчальний процес.

Практична реалізація алгоритму з використанням середовища MATLAB, яке забезпечує широкі можливості для реалізації алгоритмів теорії графів, побудови математичних моделей та

1. Початкові відстані: $A=0$, $B=\infty$, $C=\infty$, $D=\infty$, $E=\infty$.

2. Оновлення після обробки A: $B=4$, $C=2$.

3. Обробка C: $B=3$, $D=10$, $E=12$.

4. Обробка B: $D=8$, $E=12$.

5. Обробка D: $E=10$.

Послідовність роботи алгоритму можна також представити за допомогою таблиці ітерацій (Таблиця 1), де $d(v)$ — поточна мінімальна відстань від вершини A до вершини v; ∞ — позначка невідомої поки що відстані на даній ітерації; ✓ — вершина вже оброблена.

візуалізації результатів розрахунків, дозволяє здобувачам вищої освіти:

- формувати матриці суміжності транспортних мереж;
- будувати графічні моделі транспортних систем;
- визначати найкоротші маршрути між транспортними вузлами;
- аналізувати вплив зміни ваг ребер на результати оптимізації;
- виконувати порівняльний аналіз різних алгоритмів маршрутизації.

Такі завдання сприяють розвитку аналітичного мислення, формують навички алгоритмічного проєктування та підготовлюють здобувачів до розв'язання реальних задач у галузі транспортної логістики.

На рис.2 приведений приклад реалізації приведенного алгоритму у середовищі MATLAB.

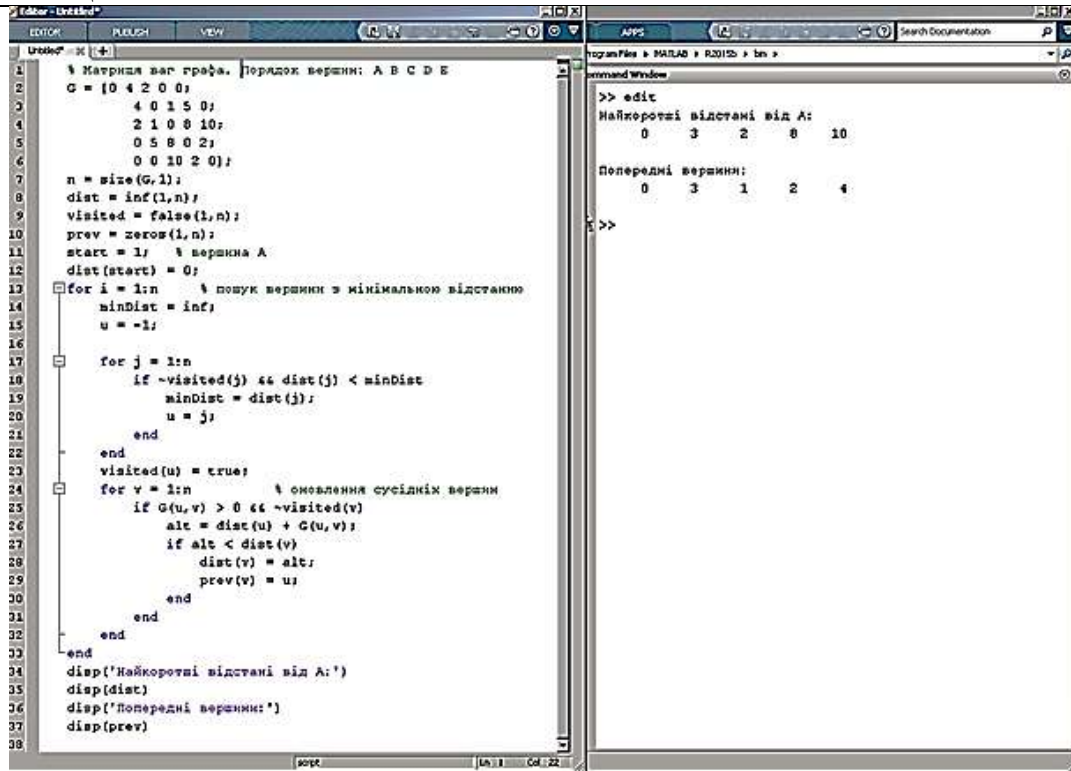


Рис.2. Реалізація приведенного алгоритму у середовищі MATLAB

Використовуючи засоби MATLAB також графа (рис.3) та виділяти кольором мінімальний можна створювати транспортну мережу у вигляді маршруту (рис.4).

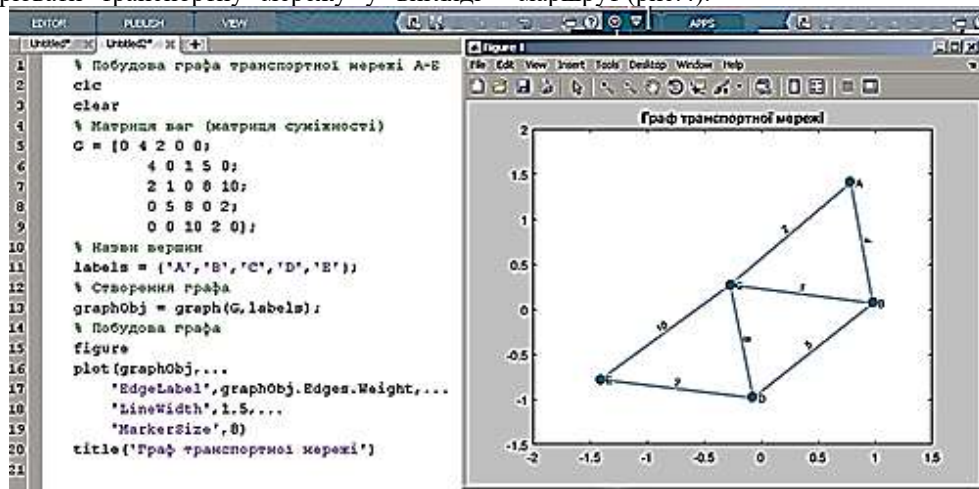


Рис.3. Створення графічного вигляду транспортної мережі

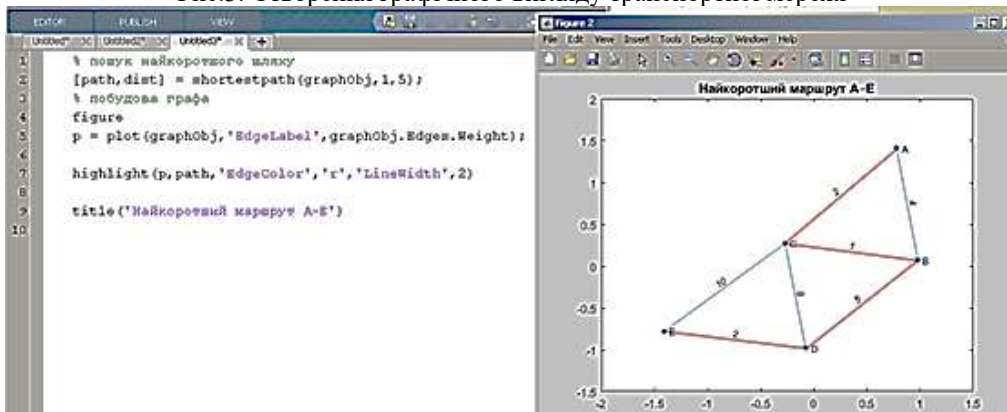


Рис.4. Позначення мінімального маршруту

Висновки

У роботі розглянуті можливості застосування алгоритму Дейкстри для розв'язання задач планування та управління транспортними перевезеннями в навчальних цілях при підготовці майбутніх фахівців транспортної галузі. Показано, що графові моделі дозволяють ефективно формалізувати транспортні мережі та використовувати алгоритми оптимізації для визначення найкращих маршрутів.

Наведений приклад демонструє практичну реалізацію алгоритму пошуку найкоротшого шляху в транспортній мережі. Запропонований підхід може бути використаний у навчальному процесі для формування у здобувачів навичок моделювання та оптимізації транспортних систем.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на використання більш складних алгоритмів оптимізації, а також інтеграцію графових моделей у системи підтримки прийняття рішень у логістиці.

Список використаних джерел

1. Ляшенко, В. М. (2026). Порівняльний аналіз оптимізаційних алгоритмів для побудови оптимізованих траєкторій руху рейкового транспорту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 1, 106–117. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i1.357888>

2. Лабенко, Д. П. (2025). Автоматизація та IT-інновації в логістиці. *Scientific Innovation: Theoretical Insights and Practical Impacts: матеріали 2 Міжнародної науково-практичної конференції* (10–12 березня 2025 р., Неаполь, Італія), 96–102. DOI: <https://doi.org/10.70286/EOSS-10.03.2025>

3. Guo, J., Liu, H., Liu, T., Song, G., & Guo, B. (2024). The multi-objective shortest path problem with multimodal transportation for emergency logistics. *Mathematics*, 12(17), Article 2615. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12172615>.

4. Guo, J., Liu, H., Liu, T., Song, G., & Guo, B. (2024). Solving the robust shortest path problem with multimodal transportation. *Mathematics*, 12(19), Article 2978. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192978>.

5. Примаченко, Г. О., Тарасов, К. О. (2024). Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів на основі генетичних алгоритмів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, промислові центри та корпоративна логістика: матеріали двадцятої науково-практичної міжнародної конференції* (6–7 червня 2024 р., Харків, Україна), 164–165. URI: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/24364> (дата звернення: 15.09.2026).

6. Ковальчук, М. С., Бондаренко, С. О. (2024). Моделювання функціонування логістичних процесів за допомогою математичних та комп'ютерних підходів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4(339), 165–168. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-27>.

7. Лабенко, Д. П. (2018). Розв'язання задач логістики засобами табличного процесора Excel. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 83, 74–77. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.83.0.74>.

8. Лабенко, Д. П. (2017). Використання середовища Excel для розв'язання задачі про призначення. *Систематика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці: збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції* (16 березня 2017 р., Харків, ХНАДУ), 44–47. URI: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/84fef219-30b6-43d9-8897-ce3dc105b2d5/download> (дата звернення: 15.09.2026).

References

1. Liashenko, V. M. (2026). Porivnialnyi analiz optymizatsiinykh alhorytmiv dlia pobudovy optymizovanykh traiektorii rukhu reikovooho transportu [Comparative analysis of optimization algorithms for constructing optimized trajectories of rail transport]. *Information and Control Systems on Railway Transport*, 1, 106–117. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i1.357888> [in Ukrainian].

2. Labenko, D. P. (2025). Avtomatyzatsiia ta IT-innovatsii v lohistytsi [Automation and IT innovations in logistics]. *Scientific Innovation: Theoretical Insights and Practical Impacts: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference* (March 10–12, 2025, Naples, Italy), 96–102. DOI: <https://doi.org/10.70286/EOSS-10.03.2025> [in Ukrainian].

3. Guo, J., Liu, H., Liu, T., Song, G., & Guo, B. (2024). The multi-objective shortest path problem with multimodal transportation for emergency logistics. *Mathematics*, 12(17), Article 2615. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12172615> [in English].

4. Guo, J., Liu, H., Liu, T., Song, G., & Guo, B. (2024). Solving the robust shortest path problem with multimodal transportation. *Mathematics*, 12(19), Article 2978. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192978> [in English].

5. Prymachenko, H. O., & Tarasov, K. O. (2024). Formuvannia alternatyvnykh marshrutiv dlia pasazhyrskykh poizdiv na osnovi henetychnykh alhorytmiv [Formation of alternative routes for passenger trains based on genetic algorithms]. *International Transport Infrastructure, Industrial Centers and Corporate Logistics: Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference* (June 6–7, 2024, Kharkiv, Ukraine), 164–165. URI: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/24364> (accessed September 15, 2026) [in Ukrainian].

6. Kovalchuk, M. S., & Bondarenko, S. O. (2024). Modeliuvannia funktsionuvannia lohistychnykh protsesiv za dopomohoiu matematychnykh ta kompiuternykh

pidkhddiv [Modeling the functioning of logistics processes using mathematical and computer approaches]. *Herald of Khmelnytskyi National University*, 4(339), 165–168. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-27> [in Ukrainian].

7. Labenko, D. P. (2018). Rozviazannia zadach lohistyky zasobamy tablychnoho protsesora Excel [Solving logistics problems using the Excel spreadsheet processor]. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 83, 74–77. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.83.0.74> [in Ukrainian].

8. Labenko, D. P. (2017). Vykorystannia seredovyshcha Excel dlia rozviazannia zadachi pro pryznachennia [Using the Excel environment to solve the assignment problem]. *Systematics, Mechatronics, Telematics of Road Machines and Systems in Educational Process and Science: Collection of Scientific Papers Based on the Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (March 16, 2017, Kharkiv, KhNADU), 44–47. URI: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/84fef219-30b6-43d9-8897-ce3dc105b2d5/download> (accessed September 15, 2026) [in Ukrainian].

Application of Dijkstra's Algorithm for Optimization of Transportation Management and Transportation Planning Tasks in the Educational Process

Abstract. The article examines the possibilities of applying graph theory algorithms to solving transportation management and transportation planning problems within the educational process of training specialists in information technologies, automation, and logistics. Modern transportation and logistics systems are characterized by a steady increase in traffic volumes, growing network complexity, and a large number of interrelated elements, which makes the search for optimal routes one of the most common tasks arising at practically every level of management on railway transport, in logistics centers, dispatching control systems, and information-management systems. The features of using the shortest path search algorithm, namely Dijkstra's algorithm, for route optimization in transport networks are analyzed in detail, including its computational scheme, the conditions under which it is applicable, and its place among other well-known shortest-path methods such as the Bellman-Ford, Floyd-Warshall, and A* algorithms. A mathematical model of a transport network is considered in the form of a weighted graph, where the vertices correspond to transport nodes and the edges represent possible transportation routes, each characterized by a weight that may express distance, travel time, transportation cost, or resource consumption. Within this model, the transportation planning problem is formalized as the problem of finding a path between a source and a destination vertex that minimizes the total weight of the route. An algorithmic description of the procedure for finding the optimal route is presented step by step,

together with a worked example of calculating the shortest path in a five-node transport network, illustrated by an iteration table that traces the change of the shortest-distance estimates at every step of the algorithm until the optimal route and its total length are obtained. The expediency of using such graph-based models in the educational process is demonstrated: they allow students to formalize transport networks as adjacency matrices, build graphical representations of transport systems, determine shortest routes between nodes, analyze the influence of edge-weight changes on optimization results, and compare different routing algorithms. This combination of mathematical modeling, algorithmic thinking, and computational practice contributes to the formation of practical skills in transport-system modeling and the application of optimization algorithms among students. A practical implementation of Dijkstra's algorithm in MATLAB is presented, including adjacency matrix construction, graph visualization, and highlighting of the optimal route. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach for incorporation into courses on computer modeling, discrete mathematics, and IT for transport specialists.

Keywords: Dijkstra's algorithm, graph model, modeling, educational process, route optimization, transportation planning, transport network.

Лабенко Дмитро Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: labenko.56@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5088-4161>.

Dmytro Petrovych Labenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Computer telecontrol of Trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: labenko.56@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5088-4161>.

Стаття надійшла 18.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 09.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

SHCHERBAK Ya. V., Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Automated Electromechanical Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

IVAKINA K. Ya., Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply Systems and Urban Power Consumption Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

NERUBATSKYI V. P., Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport

Automatic armature current control system of a motor with a pulsed converter model

Abstract. The paper considers an automatic armature current control system of a braked electric motor using a pulse model of a thyristor rectifier that takes into account the discrete nature of the electric energy conversion process and the influence of the ripple component of the control signal on the dynamic characteristics of the closed-loop system. The relevance of the study is determined by the widespread application of subordinate control systems in DC electric drives and the necessity to improve their response speed, accuracy, and adequacy of the mathematical description of dynamic processes. It is shown that the use of conventional continuous models of thyristor rectifiers does not allow full consideration of the operating features of the power converter associated with its pulse operating mode and incomplete controllability. The aim of the study is the accurate description of dynamic processes in the automatic armature current control system using a pulse model of the thyristor rectifier and the investigation of conditions for ensuring the ultimate response speed of the system. Based on the z-transform, analytical relationships describing the dynamics of the automatic armature current control system were obtained. The conditions for implementing a finite-duration process were determined, and the parameters of the current controller were synthesized to ensure the maximum response speed of the system. To verify the adequacy of the obtained theoretical results, a simulation model was developed in the MATLAB/Simulink environment using the parameters of a 24 kW 2PO200L motor. The novelty of the proposed study in comparison with known approaches based on the use of a continuous thyristor rectifier model lies in taking into account the influence of the incomplete controllability of the thyristor rectifier on the dynamics of the closed-loop automatic control structure. The practical significance of the work consists in the fact that the application of the analytical relationships obtained in the paper during the development of an automatic control system for the output variable of the thyristor rectifier makes it possible to accurately describe the dynamic process of the armature current control loop in a subordinate speed control system and to calculate the system parameters required to achieve the ultimate response speed through the implementation of a finite-duration process.

Keywords: armature current control, motor, thyristor rectifier, pulse model, automatic control system, z-transform.

Relevance of the research topic.

The modern development of DC electric drives and automatic control systems is characterized by increasing requirements for response speed, control accuracy, and energy efficiency of electromechanical systems. Of particular importance is the provision of high-quality dynamic processes in subordinate control systems, where the armature current loop determines the

response speed of the entire electric drive control system. The widespread application of thyristor rectifiers in industrial electric drives necessitates a more accurate consideration of their operating features in the analysis and synthesis of automatic control systems. The use of simplified continuous models of power converters does not always allow an adequate description of the influence of the discreteness of the energy conversion process and the ripple component of signals on the dynamics of a

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

closed-loop system. In this regard, the application of pulse models of thyristor rectifiers is of current interest, since they make it possible to improve the accuracy of the mathematical description of dynamic processes and to reasonably perform the synthesis of high-speed automatic control systems. Of particular relevance is the task of ensuring finite-duration processes in the armature current control loop, which makes it possible to achieve the ultimate response speed of the electric drive and improve the quality indicators of transient processes.

In the practice of designing automatic control systems for electric drives, subordinate control systems are widely used due to their high performance characteristics [1, 2]. The construction of a subordinate control system is based on the principle of time separation of transient processes in the inner and outer control loops [3, 4]. In this case, the inner loop has a higher response speed compared to the outer loop. The functional diagram of the subordinate electric drive control system is shown in Fig. 1.

Introduction.

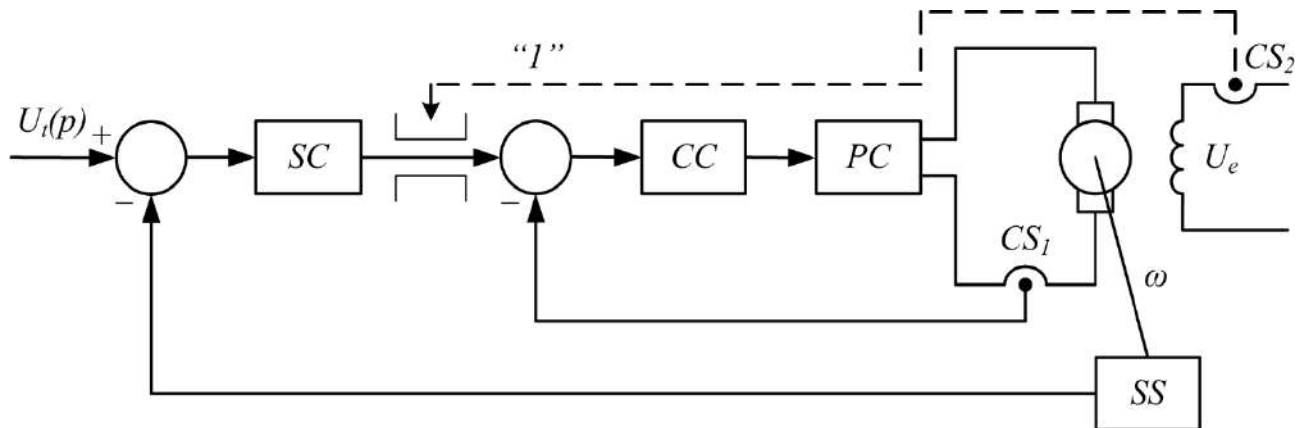


Fig. 1. Functional diagram of the subordinate electric drive control system

The following designations are used in the diagram: SC – speed controller; CC – armature current controller; PC – power converter; SS – speed sensor; CS – current sensor; «I» – dynamic signal limiter («bottleneck»).

The considered system consists of two control loops. The inner loop performs control of the motor armature current. It includes the current controller CC and the power converter PC. The armature current is measured by the current sensor CS₁. The outer loop is intended for speed control. It includes the speed controller SC, the dynamic signal limiter «I», and the speed sensor SS. The output signal of the speed controller serves as the reference signal for the subordinate current controller CC. Such a system, based on the principle of time separation of transient processes, is easily subjected to analysis, synthesis, and tuning due to its decomposition into simple controllers, each of which controls its own parameter. This decomposition makes it possible to consider separately the dynamic processes occurring in each control loop.

Analysis of recent research and publications.

Paper [5] presents a detailed description of the dynamic processes of a DC pulse converter with pulse-width modulation of the second kind operating in the continuous load current mode using the theory of generalized functions of one argument for single-sided

and double-sided reference signals. The adequacy of the obtained pulse models of the converter is verified through simulation of a high-speed output current control system in the MATLAB environment. The efficiency of applying the generalized derivative method for obtaining pulse models of a DC pulse converter with pulse-width modulation operating in the continuous current mode is demonstrated. The obtained pulse models make it possible to accurately describe dynamic processes in automatic control systems with a DC pulse converter and to calculate the controller parameters required to achieve the ultimate response speed.

In [6], a method of dual-loop discrete adaptive control (DDAC) for three-phase PWM rectifiers is proposed, which takes into account the mismatch of inductance parameters and constant load disturbance. A discrete model of a three-phase PWM rectifier is created using Euler's direct discretization method, and a double-loop discrete feedback linearization control (DDFLC) is presented. DDAC is developed based on DDFLC. First, an adaptive inductance disturbance observer (AIDO) based on the gradient descent method is proposed in the current control loop. AIDO is used to estimate disturbances caused by inductance parameter mismatches and then to compensate for these disturbances in the current controller, ensuring its high stability to inductance parameters. Second, an adaptive load parameter law (LPAL) based on discrete Lyapunov theory is proposed for the voltage control loop. LPAL evaluates the constant

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

load parameter in real time and then adjusts it in the voltage controller, achieving constant load adaptability. Simulation and experimental results show that DDAC demonstrates better steady-state and dynamic performance, lower current harmonic content than DDFLC and dual-loop discrete PI controller (DDPIC), as well as greater immunity to inductance parameters and constant load disturbances.

The study [7] compares PI controller designs in s-domains and z-domains in the context of controlling a three-phase rectifier with pulse width modulation. Using the double closed-loop control method with a pole-zero compensation approach, the parameters of the PI controller for controlling the current and voltage in the circuit are calculated. The Euler direct method is used to convert the PI controller from the s-domain to the z-domain.

In [8], a controller with an adaptive and stable structure based on a proportional-derivative fuzzy neural network of type 2 (PD-T2FNN) is proposed for controlling the voltage of the DC link of a PWM rectifier. The dynamic characteristics of the PWM rectifier using the proposed controller are evaluated using an experimental setup based on dSPACE under various operating conditions: setpoint change, step change in load on the DC side of the rectifier, setpoint change under load, and capacitive mode of operation. Experimental results are presented for traditional PD controllers, proportional-integral and T2FNN controllers to evaluate the reliability of the proposed controller. It is noted that the PWM rectifier with a PD-T2FNN DC voltage controller has better performance characteristics under all operating conditions according to the performance criteria compared to other controllers.

Article [9] proposes a method for controlling the speed of a DC motor using a three-phase thyristor converter and a module control approach. The control methodology is implemented using MATLAB/Simulink. The developed power converter is based on a thyristor. The speed of the DC motor was controlled by changing the voltage across the armature circuit.

In [10], basic diagrams of the power section were developed to ensure stable braking of a variable speed electric drive with a series excitation motor. Requirements have been developed and zones of stable operation of the dynamic braking mode have been determined. A special place in the research is given to the development of two models of an electric motor with subsequent excitation, taking into account the saturation of the magnetic circuit – mathematical and simulation.

The materials [11] discusses the principle of constructing an automatic control system for a multi-motor controlled electric drive with an electrical connection via a rotary circuit of asynchronous electric motors with phase rotors and a common inverter

controlled by a network for controlling the technological process of water supply to pump units in a water-lifting pump installation. The feasibility of constructing an automatic control system for the rotation speed of the drive motors of the pumping unit in the form of a digital electric drive implemented through a subordinate control system is revealed.

The study [12] examines the automatic control system of an electric drive and the importance of considering elastic connections. The proposed adaptive system uses an RBF neural network. The use of the proposed controller ensures resistance to disturbing influences and allows load fluctuations to be compensated. The adaptability of the system is ensured by changing parameters (load, speed of movement of mechanisms, rigidity, positioning accuracy, etc.) to match the operating conditions of the bridge crane. Thanks to this, the system is able to work effectively even under variable loads and external influences.

Article [13] presents a study of an electric drive with a frequency-controlled synchronous motor. It shows that two-link frequency converters are the most widely used for wide-range frequency control of synchronous motors. They convert the electrical energy of the power supply into electrical energy with the required voltage, current, and frequency values in two stages. This conversion is performed by special devices called autonomous inverters. It has been established that the efficiency of a two-link frequency converter is quite high – 96.5...98.5 %, which is due to the efficiency of power semiconductor devices used in the key mode of operation. It has been shown that the use of new semiconductor devices has made it possible to fundamentally change the topology of the power circuit and the principles of inverter control.

The conducted analysis of scientific publications indicates a considerable interest of researchers in the problems of improving the accuracy, response speed, and stability of automatic control systems for electric drives and power semiconductor converters. A significant part of the studies is devoted to the development of adaptive, discrete, and intelligent control methods, as well as to the improvement of current and voltage controller structures for PWM and thyristor converters. At the same time, most known approaches are based on the use of continuous models of power converters or simplified discretization methods that do not fully take into account the influence of the pulse nature of the energy conversion process on the dynamics of closed-loop control systems. The issues of analytical description of dynamic processes in automatic armature current control systems, taking into account the incomplete controllability of the thyristor rectifier and the ripple component of the control signal, remain insufficiently investigated. Of particular relevance is the task of ensuring the ultimate response speed of the system while maintaining control accuracy and stability of transient processes. This determines the necessity for

developing mathematical models and synthesis methods for automatic control systems that would more adequately describe the dynamics of an electric drive with a pulse converter. In this regard, the investigation of an automatic armature current control system using a pulse model of a thyristor rectifier is considered appropriate.

Defining the purpose and objectives of the research.

The purpose of the article is to accurately describe the dynamic processes in the automatic regulation system of the armature current of a braked electric motor using a pulse model of a thyristor rectifier, which takes into account its discreteness and influence on the dynamics of the pulsation component of the control signal. To achieve this goal, the following tasks were set:

– in accordance with the proposed structural diagram of the pulse system for automatic regulation of the armature current of a braked motor, describe the dynamic processes using a pulse model of a thyristor rectifier;

– develop a simulation model and conduct experimental studies of the dynamics of the synthesized armature current control system of a braked motor.

The main part of the research.

The block diagram of the automatic regulation system of the motor armature current loop with a pulse model of a thyristor rectifier for continuous current mode in its load circuit is shown in Fig. 2.

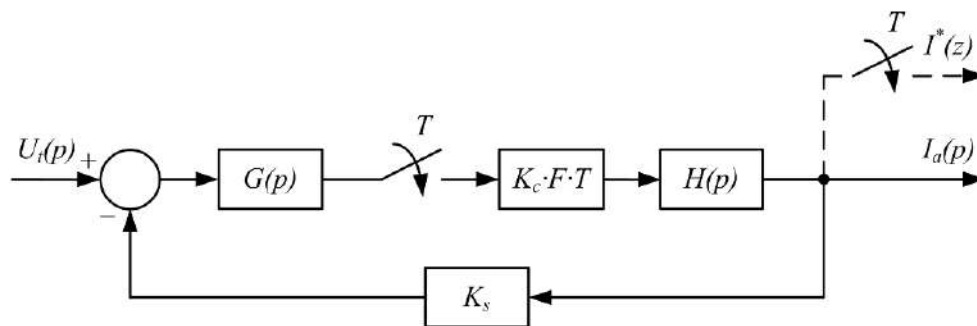


Fig. 2. Block diagram of the automatic regulation system for the motor armature current circuit

Fig. 2 shows the following symbols: $G(p)$ is the current controller transfer function,

$$G(p) = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p}; \quad H(p) \text{ is the motor armature}$$

circuit transfer function with active resistance R_a ; K_s is the current sensor transfer coefficient.

The pulse model of the converter consists of an ideal pulse element with a discrete period T and a reduced continuous part, which includes: the static transfer coefficient of the converter K_c , the discrete period T , and the ripple factor F .

Modern current sensors have a significantly higher bandwidth compared to the bandwidth of the reduced continuous part of the control system [14, 15], which makes it possible to consider it as an inertia-free link with a transfer coefficient K_s .

The relationship between the input and output signals of the automatic armature current control system, recorded in the form of a z -transform, is determined by the expression

$$I_a^*(z) = \frac{U_t G^*(z) \cdot K_c \cdot T \cdot F \cdot H^*(z)}{1 + K_c \cdot K_s \cdot T \cdot F \cdot GH^*(z)}. \quad (1)$$

The transfer function of the reduced continuous part is defined as

$$W(p) = \frac{K_c \cdot K_s \cdot T \cdot F \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{T_1 \cdot p \cdot (T_a \cdot p + 1)}. \quad (2)$$

From expression (2) it follows that the difference between the orders of the denominator and numerator polynomials is equal to one, which indicates that the output signal of the controller $G(p)$ has a finite gap. To fix the left-sided values of the input signal with a pulse element, we represent the characteristic polynomial of expression (1) as:

$$1 + z^{-1} \cdot K_c \cdot K_s \cdot F \cdot T \cdot GH^*(z, 1) = 0, \quad (3)$$

where $GH^*(z, 1)$ is the modified z -transform of the transfer function of the reduced part $W(p)$ for $\varepsilon = 1$.

According to [16] and taking into account (2), we obtain:

$$GH^*(z,1) = \frac{z}{T_1} \cdot \left[\frac{1}{z-1} - \frac{T_a - T_2 \cdot e^{-\frac{T}{T_a}}}{T_a \cdot (z - e^{-\frac{T}{T_a}})} \right] \cdot (4) \quad T_2 = T_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_a}} \right). \quad (10)$$

Substituting expression (4) into (3) and performing the transformation, we obtain the canonical formula of the characteristic equation:

$$z^2 + a_1 \cdot z + a_2 = 0,$$

where

$$a_1 = \frac{T}{T_1} \cdot K_c \cdot K_s \cdot F - 1 - e^{-\frac{T}{T_a}} - \frac{T}{T_1} \cdot \frac{K_c \cdot K_s \cdot F \cdot (T_a - T_2)}{T_a} \cdot e^{-\frac{T}{T_a}}; \quad (6)$$

$$a_2 = 1 - \frac{T}{T_1} \cdot K_c \cdot K_s \cdot F + \frac{T}{T_1} \cdot \frac{K_c \cdot K_s \cdot F \cdot (T_a - T_2)}{T_a}. \quad (7)$$

To achieve maximum speed, we will configure the armature current control loop for the final duration process [17, 18]. The conditions for configuring the system for the final duration process are determined by the system of equations [19]

$$\begin{cases} a_1 = 0; \\ a_2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

As a result of solving system (8), we obtain expressions for calculating the time constants of the current controller transfer function:

$$T_1 = T \cdot K_c \cdot K_s \cdot F \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_a}} \right); \quad (9)$$

According to the method for determining the ripple factor of multi-loop automatic control systems [20, 21], the expression for the ripple factor in a system with a reduced continuous part can be obtained, which is determined by (2):

$$F^{-1} = 1 + K_c \cdot K_s \cdot \left[\frac{T \cdot T_2}{2 \cdot T_1 \cdot T_a} + \frac{T_2 - T_a}{T_1} \cdot \frac{\omega_o \cdot T_a \cdot \text{ctg} \alpha_o - 1}{1 + (\omega_o \cdot T_a)^2} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{T}{2 \cdot T_a} \text{ctg} \frac{T}{2 \cdot T_a} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) + \frac{\text{ctg} \alpha_o}{\omega_o \cdot T_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right], \quad (11)$$

where ω_o is the circular frequency of the supply network, $\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot f_o$; m is the pulse width of the thyristor rectifier; α_o is the control angle of the thyristor rectifier.

From the analysis of expressions (9)...(11), it follows that the physical implementation of the finite duration process in the synthesized automatic control system.

Fig. 3 shows a simulation model of the armature current control system of a braked motor, built in MATLAB/Simulink. The simulation processes use the parameters of a 2PO200L motor with a power of 24 kW and a supply voltage of 220 V. The current controller parameters are calculated in accordance with conditions (9) and (10). The graphs of transient processes obtained as a result of simulation modeling are shown in Fig. 4.

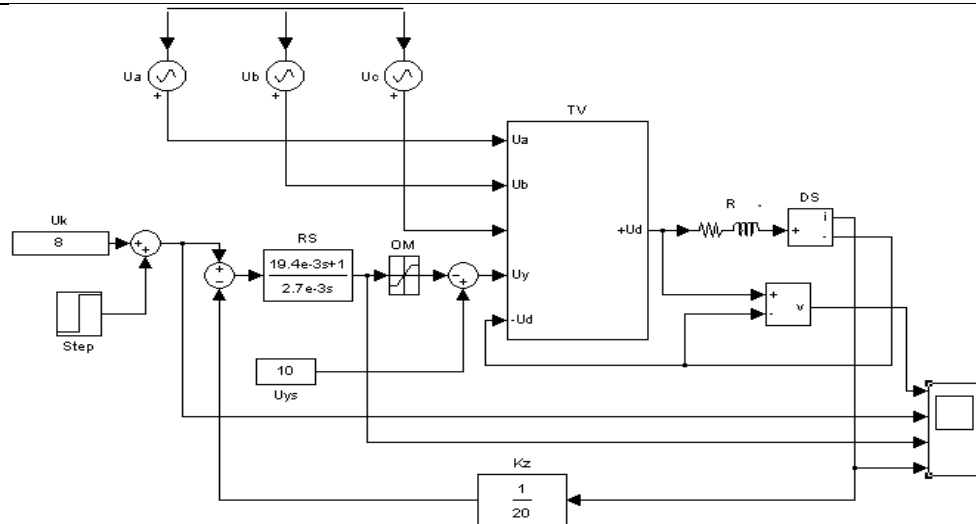


Fig. 3. Simulation model of the armature current control system of a braked motor:

RS – current controller; OM – control signal limiter of the TV thyristor rectifier;

R – active-inductive circuit of the motor armature; DS – sensor for measuring the armature current

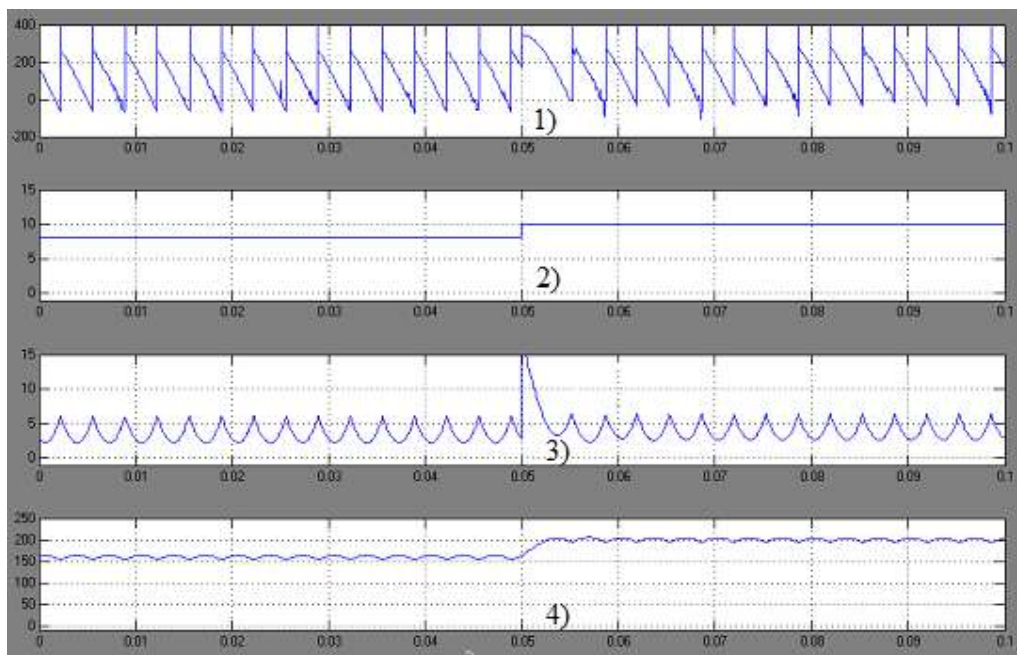


Fig. 4. Oscillograms of transient processes:

1 – output voltage of the thyristor rectifier; 2 – control signal of the thyristor rectifier TV ; 3 – output signal of the current controller RS ; 4 – motor armature current

From the obtained oscillograms it follows that the transient process ends in two clock intervals of the thyristor rectifier, which corresponds to the order of the control system.

Conclusions. The study investigates an automatic armature current control system of a braked

electric motor using a pulse model of a thyristor rectifier. It is shown that the use of the pulse model makes it possible to describe the dynamic processes in the closed-loop control system more accurately in comparison with traditional continuous models, since the discrete operating nature of the thyristor converter and the influence of the ripple component of the control signal are taken into

account. Based on the z-transform, analytical relationships describing the dynamics of the motor armature current control loop were obtained, and the conditions for implementing a finite-duration process were determined. It was established that tuning the automatic control system to a finite-duration process ensures the ultimate response speed of the system and contributes to improving the quality of transient processes in the subordinate electric drive speed control system. The simulation model developed in the MATLAB/Simulink environment confirmed the adequacy of the obtained theoretical results. According to the simulation results, it was found that the transient process is completed within two sampling intervals of the thyristor rectifier, which corresponds to the order of the synthesized control system. The obtained results can be used in the synthesis of high-speed automatic control systems for DC electric drives with thyristor converters, as well as in further studies of the dynamics of pulse electromechanical systems.

Reference

1. Stephan, R. M., Hahn, V., Dastych, J., & Unbehauen, H. (1991). Adaptive and robust cascade schemes for thyristor driven DC-motor speed control. *Automatica*, 27 (3), 449–461. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(91\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0005-1098(91)90103-9)
2. Gao, S., Wang, Q., Li, G., Li, Z., Qian, Z., Zhang, Q., & Diao, K. (2026). A review of multi-motor coordinated control technologies: advanced strategies, intelligent algorithms, and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 225, 116188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116188>
3. El-Hefnawy, A. A., & Mahmoud, S. A. (1983). Speed and current control of DC motor in continuous current operation. *Electric Machines & Power Systems*, 8 (2), 79–87. <https://doi.org/10.1080/07313568308955477>
4. Arahall, M. R., Satué, M. G., Colodro, F., & Martínez-Heredia, J. M. (2024). Trade-off analysis of drive dynamics considering speed and current loops. *Energies*, 17 (15), 3649. <https://doi.org/10.3390/en17153649>
5. Shcherbak, Y. V., Ivakina, K. Y., & Nerubatskyi, V. P. (2025). Dynamics of a pulse-width converter using the theory of generalized functions. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 212, 315–330. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336550>
6. Hou, B., Qi, J., & Li, H. (2024). Discrete-time adaptive control for three-phase PWM rectifier. *Sensors*, 24 (10), 3010. <https://doi.org/10.3390/s24103010>
7. Nurwati, T., Gradianto, G., Siswoyo, B., Mosaddegh, B., & Satiawan, N. W. (2024). Discrete implementation of a PI controller for three-phase PWM rectifier. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, 18 (2), 58–62. <https://doi.org/10.21776/jeeccis.v18i2.1666>
8. Acikgoz, H., Coteli, R., Dandil, B., & Ata, F. (2019). Experimental evaluation of dynamic performance of three-phase AC–DC PWM rectifier with PD-type-2 fuzzy neural network controller. *IET Power Electronics*, 12 (4), 693–702. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5006>
9. Saini, P., Rawat, N., & Dixit, A. (2020). Design and analysis of thyristor based DC drive system for speed control of DC motor. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 11 (5), 921–928. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.5.2020.098>
10. Kenessova, P., Kaverin, V., & Tatkeyeva, G. (2023). Variable-speed drive with series-excited motors in dynamic braking mode. *Ekspluatatsiya i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 25 (1). <http://doi.org/10.17531/ein.2023.1.9>
11. Khamudkhanova, N., Idriskhodjaeva, M., & Kholbutayeva, K. (2023). Construction principle of automatic control system adjustable multi-engine drive water lift pump unit. *E3S Web of Conferences*, 384, 01057. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401057>
12. Olieinikov, M. (2024). Automatic control system for the electric drive of an overhead crane considering elastic connections. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 3, 25–35. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3>
13. Rudniev, Y. S., Romanchenko, J. A., & Brozhko, R. M. (2024). Electric drive with frequency-regulated synchronous motor with high precision digital sensors. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3 (283), 38–42. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-38-42>
14. Du, X., Du, L., Chen, Y., Wei, Y., Stratta, A., & Mantooth, H. A. (2023). A nonlinear-model-based high-bandwidth current sensor design for switching current measurement of wide bandgap devices. *Sensors*, 23 (10), 4626. <https://doi.org/10.3390/s23104626>
15. Crescentini, M., Syeda, S. F., & Gibiino, G. P. (2022). Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. *IEEE Sensors Journal*, 22 (11), 10137–10151. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766>
16. Shcherbak Ya. V., Nerubatskyi V. P., & Ivakina K. Ya. (2024). Microcircuitry of electromechatronic systems: textbook. Kharkiv: Publisher Machulin L. I. 260.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

17. Shcherbak Ya. V., & Nerubatskyi V. P. (2013). Dynamichni kharakterystyky systemy avtomatychnoho rehuliuвання strumu v rezhymy elektrychnoho halmuvannia [Dynamic characteristics of the system of automatic control of current in the mode of electric braking]. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 1, 58–63.
18. Shcherbak Ya. V., & Nerubatskyi V. P. (2015). Dynamichni koefitsiient peredachi statychnoho peretvoriuvacha systemy avtomatychnoho rehuliuвання elektrychnym halmuvanniam [Dynamic coefficient of transfer of the static converter of system of automatic control by electric braking]. *Collected scientific works of Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 153, 5–12. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.63861>
19. Shcherbak, Y., Semenenko, Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., & Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (110)), 71–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827>
20. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Hordiienko, D., & Podnebenna, S. (2021). Synthesis of a regulator recuperation mode a DC electric drive by creating a process of finite duration. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Proceedings*, 272–277. <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575792>
21. Vereshchaho, Ye., Kostiuchenko, V., Stohniienko, Ye., & Hrieshnov, A. (2024). Keruvannia dynamikoju impulsnoho peretvoriuvacha z m'iakym peremykanniam, shcho pratsiuie na duhove navantazhennia [Control of the dynamics of a soft-switching pulse converter operating with an arc load]. *Technical Electrodynamics*, 6, 021. <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021>
22. current operation. *Electric Machines & Power Systems*. Vol. 8, Iss. 2. P. 79–87. <https://doi.org/10.1080/07313568308955477>
23. Arahal, M. R., Satué, M. G., Colodro, F., Martínez-Heredia, J. M. (2024). Trade-off analysis of drive dynamics considering speed and current loops. *Energies*. Vol. 17, Iss. 15. 3649. <https://doi.org/10.3390/en17153649>
24. Shcherbak, Y. V., Ivakina, K. Y., Nerubatskyi, V. P. (2025). Dynamics of a pulse-width converter using the theory of generalized functions. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Вип. 212. С. 315–330. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336550>
25. Hou, B., Qi, J., Li, H. (2024). Discrete-time adaptive control for three-phase PWM rectifier. *Sensors*. Vol. 24, Iss. 10. 3010. <https://doi.org/10.3390/s24103010>
26. Nurwati, T., Gradiano, G., Siswoyo, B., Mosaddegh, B., Satiawan, N. W. (2024). Discrete implementation of a PI controller for three-phase PWM rectifier. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*. Vol. 18, No. 2. P. 58–62. <https://doi.org/10.21776/jeeccis.v18i2.1666>
27. Acikgoz, H., Coteli, R., Dandil, B., Ata, F. (2019). Experimental evaluation of dynamic performance of three-phase AC–DC PWM rectifier with PD-type-2 fuzzy neural network controller. *IET Power Electronics*. Vol. 12, Iss. 4. P. 693–702. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5006>
28. Saini, P., Rawat, N., Dixit, A. (2020). Design and analysis of thyristor based DC drive system for speed control of DC motor. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. Vol. 11, Iss. 5. P. 921–928. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.5.2020.098>
29. Kenessova, P., Kaverin, V., Tatkeyeva, G. (2023). Variable-speed drive with series-excited motors in dynamic braking mode. *Ekspluatatsja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. Vol. 25, Iss. 1. <http://doi.org/10.17531/ein.2023.1.9>
30. Khamudkhanova, N., Idriskhodjaeva, M., Kholbutayeva, K. (2023). Construction principle of automatic control system adjustable multi-engine drive water lift pump unit. *E3S Web of Conferences*. Vol. 384. 01057. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401057>
31. Olieinikov, M. (2024). Automatic control system for the electric drive of an overhead crane considering elastic connections. *Electrical Engineering and Power Engineering*. No. 3. P. 25–35. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3>
32. Stephan, R. M., Hahn, V., Dastych, J., Unbehauen, H. (1991). Adaptive and robust cascade schemes for thyristor driven DC-motor speed control. *Automatica*. Vol. 27, Iss. 3. P. 449–461. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(91\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0005-1098(91)90103-9)
33. Gao, S., Wang, Q., Li, G., Li, Z., Qian, Z., Zhang, Q., Diao, K. (2026). A review of multi-motor coordinated control technologies: advanced strategies, intelligent algorithms, and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 225. 116188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116188>
34. El-Hefnawy, A. A., Mahmoud, S. A. (1983). Speed and current control of DC motor in continuous

Список використаних джерел

13. Rudniev, Y. S., Romanchenko, J. A., Brozhko, R. M. (2024). Electric drive with frequency-regulated synchronous motor with high precision digital sensors. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. No. 3 (283). P. 38–42. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-38-42>

14. Du, X., Du, L., Chen, Y., Wei, Y., Stratta, A., Mantooth, H. A. (2023). A nonlinear-model-based high-bandwidth current sensor design for switching current measurement of wide bandgap devices. *Sensors*. Vol. 23, Iss. 10. 4626. <https://doi.org/10.3390/s23104626>

15. Crescentini, M., Syeda, S. F., Gibiino, G. P. (2022). Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 22, No. 11. P. 10137–10151. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766>

16. Щербак, Я. В., Нерубацький, В. П., Івакіна, К. Я. (2024). Мікросхемотехніка електромеханотронних систем: підручник / за заг. ред. Я. В. Щербака. Харків: Видавець Мачулін Л. І. 260 с.

17. Щербак, Я. В., Нерубацький, В. П. (2013). Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. № 1. С. 58–63.

18. Щербак, Я. В., Нерубацький, В. П. (2015). Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Вип. 153. С. 5–12. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.63861>

19. Shcherbak, Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 2 (110). P. 71–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827>

20. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Hordiienko, D., Podnebenna, S. (2021). Synthesis of a regulator recuperation mode a DC electric drive by creating a process of finite duration. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Proceedings*. P. 272–277. <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575792>

21. Верещаго, Є., Костюченко, В., Стогнієнко, Є., Грешнов, А. (2024). Керування динамікою імпульсного перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на дугове навантаження. *Технічна електродинаміка*. № 6. 021. <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021>

Щербак Я. В., Івакіна К. Я., Нерубацький В. П. Система автоматичного регулювання струму якоря двигуна з імпульсною моделлю перетворювача

Анотація. У статті розглянуто систему автоматичного регулювання струму якоря загальмованого електродвигуна із застосуванням імпульсної моделі тиристорного випрямляча, яка враховує дискретний характер процесу перетворення електричної енергії та вплив пульсаційної складової сигналу керування на динамічні характеристики замкнутої системи. Актуальність дослідження обумовлена широким застосуванням підлеглих систем керування в електроприводах постійного струму та необхідністю підвищення їхньої швидкодії, точності й адекватності математичного опису динамічних процесів. Показано, що використання традиційних безперервних моделей тиристорного випрямляча не дає змогу повною мірою врахувати особливості роботи силового перетворювача, пов'язані з його імпульсним режимом функціонування та неповною керованістю. Метою роботи є точний опис динамічних процесів у системі автоматичного регулювання струму якоря із застосуванням імпульсної моделі тиристорного випрямляча та дослідження умов забезпечення граничної швидкодії системи. На основі з-перетворення отримано аналітичні залежності, які описують динаміку системи автоматичного регулювання струму якоря. Визначено умови реалізації процесу кінцевої тривалості та синтезовано параметри регулятора струму для забезпечення максимальної швидкодії системи. Для перевірки адекватності отриманих теоретичних результатів розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink із використанням параметрів двигуна 2ПО200L потужністю 24 кВт. Новизна запропонованої роботи порівняно з відомими, що базовані на застосуванні безперервної моделі тиристорного випрямляча, полягає в урахуванні впливу на динаміку замкнутої структури автоматичного регулювання неповної керованості тиристорного випрямляча. Практична цінність роботи полягає в тому, що застосування отриманих у статті аналітичних залежностей для розроблення системи автоматичного регулювання вихідної координати тиристорного випрямляча дає змогу точно описати динамічний процес контуру регулювання струму якоря в системі підлеглого регулювання швидкості та розрахувати параметри системи для отримання граничної швидкодії за рахунок реалізації процесу кінцевої тривалості.

Ключові слова: регулювання струму якоря, двигун, тиристорний випрямляч, імпульсна модель,

система автоматичного регулювання, з-перетворення.

Shcherbak Yakiv Vasylovych, Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Automated Electromechanical Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». E-mail: yvsh47@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-5609-2528.

Ivakina Kateryna Yakivna, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply Systems and Urban Power Consumption Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: ivakina.kat@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4315-6406.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Щербак Яків Васильович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». E-mail: yvsh47@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-5609-2528.

Івакіна Катерина Яківна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: ivakina.kat@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4315-6406.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Стаття надійшла 26.06.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 15.07.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

СЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Модернізація мереж поїзного радіозв'язку гектометрового діапазону

Впровадження мереж рухомого радіозв'язку на залізницях України розпочалося на початку 50-х років минулого століття на основі радіозасобів гектометрового діапазону радіохвиль. Використовуючи направляючі лінії, радіозасоби КХ діапазону забезпечують необхідну дальність в умовах експлуатації. На цей час їх використання не відповідає сучасному розвитку цифрових радіотехнологій і додаткових сервісів у мережах поїзного радіозв'язку. Збереження в лінійних системах радіозасобів гектометрового діапазону є анахронізмом, і їх використання недоцільне в подальшому, бо стримує запровадження цифрових мереж.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, направляючі лінії, дальність радіозв'язку, модернізація мереж ПРЗ.

Вступ

Використання радіозасобів гектометрового діапазону (ГМ) на залізницях розпочалося на початку 50-х років після розроблення першої залізничної радіостанції ЖР-1. Згідно з частотним планом, діапазон гектометрових радіохвиль 0,3-3,0 МГц призначений разом з іншими застосунками для організації каналів рухомого радіозв'язку морської та повітряної служб і застосування в мережах технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті [1]. Використання ГМ діапазону було виправдано, тому що відповідали рівню розвитку радіотехнічних засобів того часу, а перші радіостанції ультракороткохвильового діапазону (УКХ) ЖР-5 розроблена лише в 1958 році [2].

Поїзний радіозв'язок (ПРЗ) на залізницях організований у гектометровому діапазоні радіохвиль у лінійних мережах і метровому діапазоні для зонних мереж. І на сьогодні канали гектометрового діапазону є основними в системі поїзного диспетчерського зв'язку машиністів локомотивів із поїзним диспетчером і черговими по станції [3].

За теорією випромінювання електромагнітних хвиль, ефективні антени повинні мати довжину не менше $\frac{\pi}{4}$. Для УЗ використовують частоти 2,13 і 2,15 МГц із довжиною хвилі близько 141 м, тоді довжина лінійної антени складає 35 м.

У діапазоні гектометрових радіохвиль коефіцієнт корисної дії стаціонарних антен для висоти підвісу 20-30 м досягає 30-55 %, а коефіцієнт корисної дії локомотивних антен через обмежену довжину – лише 2-4 %.

У мережах ПРЗ антени носимих радіостанцій гектометрового діапазону не використовують через великі розміри [2, 4].

Основні положення організації лінійних мереж ПРЗ унормовані в Правилах організації і розрахунку мереж ПРЗ та інших нормативних документах [5, 6].

Таке рішення було виправдано на початку 50-х років минулого сторіччя, тому що в цьому діапазоні були освоєні радіотехнології і розпочато виробництво залізничних радіозасобів. На сьогодні таке рішення не є адекватним сучасному стану радіотехнологій. У цьому діапазоні неможливо впроваджувати цифрові технології та організувати дуплексний режим роботи, що спрощує організацію хендоверу і забезпечує безперервність радіоканалу з переміщенням уздовж диспетчерської ділянки [7, 8].

У гектометровому діапазоні обмежена кількість радіоканалів і невисока завадозахищеність. Це потребує використання направляючих ліній поїзного радіозв'язку, для яких широко використовують лінії електропостачання. Ці лінії одночасно можна використовувати для живлення мікропроцесорних пристроїв систем автоматики. При цьому виникає вплив радіочастот на мікропроцесорні пристрої, що може вплинути на надійність функціонування [9].

Свого часу використання радіозасобів ГМ діапазону було виправдано за рахунок можливості організації радіоканалів у складних умовах, тунелях залізниць, використання в локальних зонах спрощувало забезпечення ЕМС у лінійних мережах [10].

Такий довгий термін застосування застарілих радіостанцій не відповідає сучасному стану розвитку систем рухомого радіозв'язку і затримує впровадження сучасних цифрових мереж у системах автоматизованого керування рухом поїздів [11, 12]. Це недоцільно і в подальшому, бо затримує впровадження сучасних цифрових радіозасобів.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Постановка проблеми

Аналіз функціонування мереж ПРЗ гектометрового діапазону та розроблення рекомендацій із їх модернізації.

Основні результати

Поїзний радіозв'язок на залізничному транспорті призначений для оперативного зв'язку між машиністами поїзних локомотивів і працівниками, відповідальними за організацію руху: поїзним диспетчером, черговими по станціях у лінійних мережах і широким колом абонентів, розосереджених уздовж перегону в зонних мережах.

Лінійні мережі організовані вздовж всієї диспетчерської ділянки з використанням стаціонарних радіостанцій, які встановлені на проміжних станціях і з'єднані лінійним каналом із диспетчерським пунктом.

Увесь час лінійні мережі ПРЗ працюють у мінімально необхідні рівні корисних сигналів і дальність зв'язку залежно від виду тяги

гектометровому діапазоні радіохвиль. Зонні мережі організовані безпосередньо в зоні дії радіостанцій абонентів і працюють у метровому діапазоні.

На залізничному транспорті на ділянках електрифікованих залізниць за рахунок випромінювання радіохвиль із використанням антен дальність поїзного радіозв'язку обмежена [4, 5].

Дальність суттєво залежить від виду тяги. Для різних видів тяги дальність радіозв'язку та параметри сигналів наведена в таблиці.

Параметр мережі	Вид тяги		
	Тепловозна	Постійний струм	Змінний струм
$U_{2, \text{мін}}, \text{дБ}$	47	70	72
Дальність зв'язку, стаціонарні антени, одне навантаження, км	14	4,5	4,2
Дальність зв'язку, стаціонарні антени, два навантаження, км	11,5	3,5	3,2
Дальність зв'язку з використанням направляючих ліній, км	-	16,9	11,4
$U_{2, \text{мін}}, \text{мкВ}$	223	3150	3900

Для роботи зі стаціонарними антенами розрахункова дальність на ділянках із тепловозною тягою досягає 14 км, ділянка постійного струму – 4,5 км, змінного струму – 4,2 км. На ділянках з електротягою дальність суттєво зменшується і з електротягою змінного струму складає лише 4,2 км. Отже, за тепловозної тяги забезпечена необхідна дальність передавання сигналів. На електрифікованих ділянках дальність суттєво зменшується. Це в першу чергу пов'язано зі значними рівнями індустриальних радіозавод у цьому діапазоні. Значні рівні індустриальних радіозавод потребують підвищення рівня корисних сигналів за низької ефективності локомотивних антен. Так, на частоті 2,13 МГц мінімальний рівень сигналів гектометрового діапазону зростає на ділянках змінного струму 72 дБмкВ, або понад 3000 мкВ.

Тому в перший період застосування технологічний радіозв'язок гектометрового діапазону

використовували лише на станціях через обмежену дальність на електрифікованих ділянках.

Для забезпечення необхідної дальності радіозв'язку гектометрового діапазону було ухвалено рішення використовувати направляючі лінії для передавання високочастотної електромагнітної енергії радіохвиль, які проходять уздовж перегонів. Із цією метою підвішують спеціальні хвилеводні проводи. Також використовують високовольні проводи ліній електропостачання нетягових споживачів, які розташовані вздовж залізничних ліній. На ділянках змінного струму ефективним засобом передавання енергії радіохвиль є використання двопровідних несиметричних ліній ДПР, а на ділянках постійного струму трифазні високовольні лінії ВЛ 6, 10 кВ, проходження яких збігається з напрямком лінії. Із віддаленням ВЛ від колії більш ніж на 20 м необхідно на цій ділянці додатково використовувати хвилеводний провід. При цьому електромагнітна

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

енергія радіосигналів сконцентрована безпосередньо в зоні проходження проводів [3].

Використовуючи направляючі лінії, радіостанція може бути підключена безпосередньо через високовольтні конденсатори до ліній електропостачання або індуктивним способом через спеціальні схеми збудження. Схема високочастотного збудження двох проводів трипроводної

високовольтної лінії ВЛ 10 кВ наведена на рисунку. У проводах використано протифазне збудження і сформована міжпроводна хвиля, яка поширюється з меншим згасанням.

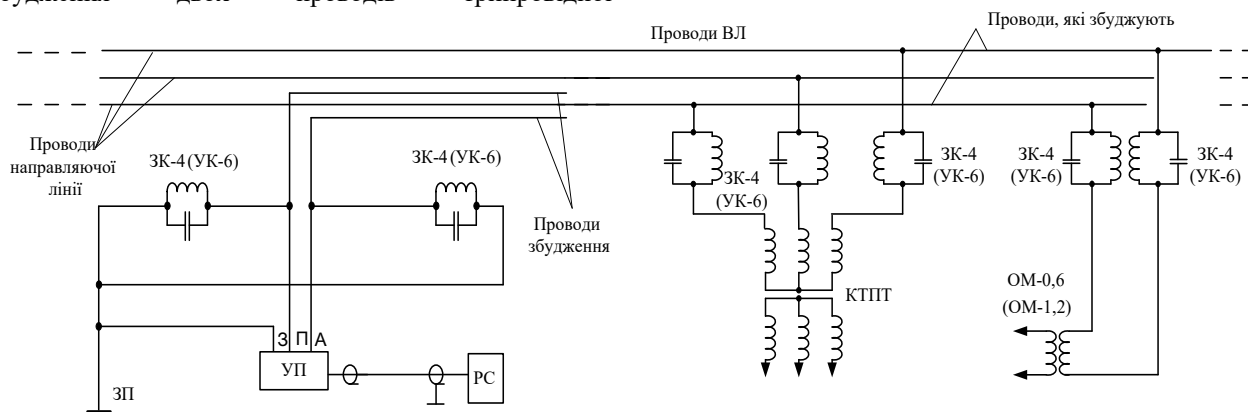


Рис. Схеми індуктивного збудження каналу ПРЗ і підключення силового обладнання

Із безпосереднім підключенням уся потужність передається в хвильоводний провід. Але частіше використовують індуктивний спосіб збудження. Для цього підвішують паралельно направляючій лінії збуджуючий провід довжиною 35-40 м на відстані від 0,6 м до 1 м від направляючої лінії, що виключає гальванічний зв'язок із високовольтними проводами. В усіх схемах із передаванням сигналів ураховують додаткові згасання в каналі передавання. Напряга радіосигналу в проводах направляючої лінії в зоні збудження становить близько 14,2 В.

Дальність радіозв'язку в каналах із направляючими лініями визначають з урахуванням усіх складових згасання за формулою [5]:

$$\Gamma = \frac{A_{\text{прд}} - U_{\text{мін}} - A_{\text{пер}} - \sum a_{\text{ст}} - \sum a_{\text{лін}} - \sum a_{\text{лок}}}{\alpha_c} \quad (1)$$

Повздожнє згасання з передаванням сигналів радіозв'язку для однопроводного хвильоводу на відкритому повітрі складає 2,5 дБ, ліній ДПР 2,1 дБ, а ВЛ 10 кВ близько 2,2 дБ, що приблизно рівнозначно. Із використанням направляючих ліній дальність радіозв'язку зростає. Результати розрахунку з направляючими лініями наведені в таблиці.

На станціях із розвиненою колійною структурою необхідно використовувати підключення на два навантаження для віддаленої відстані від направляючих проводів. Використання двох навантажень призводить до зменшення реальної дальності зв'язку.

Цифри дальності в таблиці є максимальними за типових умов і в більшості випадків задовольняє необхідні дальності перегонів. У реальних умовах дальність може знижуватися з використанням ліній повздожнього електропостачання за рахунок згасання, що вносять лінійні пристрої мережі енергозабезпечення.

На рисунку наведена схема індуктивного збудження високовольтної направляючої лінії ВЛ 10 кВ із підключенням силового обладнання.

До високовольтних ліній, по яких передають радіосигнал, підключені трифазні та однофазні трансформатори засобів живлення систем автоматики. Підключення силового обладнання призводить до збільшення згасання в тракті передавання радіосигналів, яке суттєво залежить від довжини проводів. Запираючі контури в кожному з проводів настроєні на частоту каналу ПРЗ і забезпечують зниження шунтуючої дії відгалужень.

Запираючий контур ЗК-4 виконаний за схемою паралельного контуру і містить котушку індуктивності з проводом 4 мм, який забезпечує пропускання струму живлення і конденсатор відповідної ємності. У схемах контурів використовують високовольтні керамічні конденсатори К15У-1/К15У-2 відповідної ємності. У процесі експлуатації під впливом метеорологічних факторів змінюється ємність конденсаторів, що призводить до розстроювання контуру та зниження його добротності і опору. При цьому зростає вплив підключених пристроїв на канал ПРЗ. Погіршення якості радіозв'язку свідчить про деградацію

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

запираючих контурів.

Зі зменшенням опору запираючих контурів у силових проводах живлення сигнали поїзного радіозв'язку можуть проходити у схеми живлення мікропроцесорних пристроїв СЦБ за принципом кондуктивних завад [9]. Це може призвести до створення небезпечних станів систем керування рухом поїздів.

Згідно з інструкцією [13], працівники дистанцій сигналізації та зв'язку і енергопостачання проводять періодичну перевірку стану загороджувачів, добротність яких має бути 100-120. Це збільшує експлуатаційні витрати на утримання мереж поїзного радіозв'язку і є ще одним фактором відмови від використання каналів гектометрового діапазону.

Із використанням радіозасобів гектометрового діапазону з направляючими лініями рельєф мало впливає на рівень сигналу і можливість організації каналів у залізничних тунелях.

Високовольтні лінії обходять тунелі або прокладають у кабелі і не використовують у тунелі. Хвильоводний провід можна безпосередньо використовувати в тунелі. Але з використанням однопровідного хвильовода в тунелі згасання зростає, і використовують двопровідні хвильоводи [10].

Наявність позитивних властивостей із використанням направляючих ліній радіомереж ПРЗ дозволила зберегти мережі ПРЗ ГМ до нашого часу. У цілому лінійні мережі ПРЗ ГМ задовольняють основні експлуатаційні вимоги для систем ПРЗ. Але комплекс негативних факторів використання гектометрового діапазону радіохвиль зберігається. Це не дає змогу реалізувати сучасні технічні рішення.

Відмова від мереж ГМ у системах керування рухом поїздів невідворотна, і виникає тільки питання, коли і яку технологію цифрового радіозв'язку УКХ діапазону необхідно вибрати.

Висновки

1. Впровадження засобів рухомого технологічного радіозв'язку на залізницях України розпочалося після розроблення першої залізничної радіостанції ЖР-1, яка працювала в гектометровому діапазоні радіохвиль.

2. Згідно з Частотним планом, для організації мереж технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті виділені два канали з частотою 2,13 і 2,15 МГц у гектометровому діапазоні з довжиною радіохвилі близько 141 м.

3. Значна довжина хвилі коливань гектометрового діапазону потребує застосування протяжних лінійних антенних систем. Реалізація

ефективних компактних антен у ГМ-діапазоні є складною, особливо для мобільних і носимих радіозасобів у мережах рухомого радіозв'язку на залізничному транспорті. Коефіцієнт корисної дії локомотивних антен довжиною 7-12 м, встановленої на висоті 0,8-1,0 м над дахом локомотива, складає 3-4 %.

4. Значні рівні індустриальних радіозавод потребують підвищення рівня корисних сигналів для низької ефективності локомотивних антен. Так, у робочому діапазоні 2,13 МГц на ділянках, електрифікованих змінним струмом, мінімальний рівень сигналів ГМ діапазону складає 72 дБмкВ, або понад 3000 мкВ.

5. Дальність передавання в каналі ПРЗ гектометрового діапазону з використанням стаціонарних антен складає на ділянках змінного струму лише 4,2 км, що не задовольняє вимоги ПТЕ.

6. Використовуючи направляючі лінії, хвильоводний провід або кольорові проводи повздовжнього електропостачання, дальність на ділянках змінного струму зростає до 11,4 км.

7. Системи збудження високо частотних сигналів у проводах високовольтних ліній 6,10 кВ створюють напругу 14,2 В. Для зменшення впливу на характеристики радіосигналів пристрої живлення автоматики підключають до проводів високовольтної лінії через запираючі контури.

8. Із деградацією властивостей запираючих контурів проникнення сигналів поїзного радіозв'язку викликає погіршення якості зв'язку та може створити небезпечне джерело електромагнітних завад для мікропроцесорних засобів автоматики, напруга яких перевищує прийняті в стандартах норми стійкості до кондуктивних завад (10 В).

9. Із використанням направляючих ліній зростають експлуатаційні витрати.

10. Із використанням радіозасобів УКХ діапазону дальність радіозв'язку може становити для ділянок з автономною тягою до 26 км, на ділянках постійного струму – до 15,6 км а ділянках змінного струму – до 11,8 км, що відповідає вимогам організації мереж у межах перегонів залізниць. Це є переконливим аргументом на користь впровадження лінійних мереж ПРЗ в УКХ діапазоні.

11. Організація лінійних мереж ПРЗ в УКХ діапазоні дає змогу забезпечити виконання умов дальності радіозв'язку і впровадження сучасних цифрових мереж у дуплексному режимі, хендовер та інші сервіси цифрових систем.

Список використаних джерел

1. План розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 19.12.2023 р. № 1340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF#n251>

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: навч. посіб. / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлізаренко, Н. А. Корольова. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 145 с.
3. Правила технічної експлуатації залізниць України / Міністерство транспорту України. ЦРБ 0004. Київ, 2007.
4. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. Київ : НТУ України «КПІ», 2014. 336 с.
5. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058 / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
6. Правила експлуатації поїзного радіозв'язку: затв. Наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 24.09.2007 р. № 452-Ц. Київ, 2007. 45 с.
7. Єлізаренко А. О., Єлізаренко І. О. Особливості впровадження сучасних цифрових радіотехнологій на мережах зв'язку залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 1. С. 10-16.
8. Гончаренко В. І., Карлін В., Медведєв Я. Єдина платформа для організації цифрового технологічного радіозв'язку стандарте DMR. *Українська залізниця*. 2018. № 1-2. С. 20-26.
9. Кустов В. Ф., Єлізаренко А. О. Нормування і вплив завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц на порти живлення електронних пристроїв СЦБ рівнів SIL $\frac{3}{4}$. *Зб.наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2026. Вип. 216. С. 289-313.
10. Єлізаренко А. О. Організація мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості та в тунелях залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2026. № 1. С. 10-17.
11. GSM-R. Procurement & Implementation Guide. International Union of Railways-Paris, 2009. 246 с.
12. Standard ETSI 102361-1 v1.4.5. Elektromagnetik compatibility and Radio spectrum Matters. Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part1. DMR AIR Interface protocol – France. ETSI, 2007. 172 с.
13. ЦШ-0047. Інструкція з технічного обслуговування направляючих ліній (хвильоводів) поїзного радіозв'язку. Київ: ТОВ «Швидкий рух», 2007. 22 с.
- <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF#n251> [in Ukrainian].
2. Panchenko, S. V., Prykhodko, S. I., Yelizarenko, A. O., & Korolova, N. A. (2024). *Radiotekhnichni systemy zaliznychnoho transportu* [Radio engineering systems of railway transport]. UkrDUZT [in Ukrainian].
3. Ministerstvo transportu Ukrainy. (2007). *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy* [Rules for the technical operation of Ukrainian railways] (TsRB 0004) [in Ukrainian].
4. Pilinskyi, V. V. (2014). *Tekhnichna elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl* [Technical electrodynamics and radio wave propagation]. NTU Ukrainy “KPI” [in Ukrainian]
5. Derzhavna administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy Ukrzaliznytsia. (2009). *Pravyla orhanizatsii ta rozrakhunku merezh poizdnoho radiozviazku TsSh-0058* [Rules for the organization and calculation of train radio communication networks TsSh-0058] [in Ukrainian].
6. Derzhavna administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy. (2007). *Pravyla ekspluatatsii poizdnoho radiozviazku* [Rules for the operation of train radio communication] (Order No. 452-Ts) [in Ukrainian].
7. Yelizarenko, A. O., & Yelizarenko, I. O. (2018). *Osoblyvosti vprovadzhennia suchasnykh tsyfrovyykh radiotekhnolohii na merezhakh zviazku zaliznyts* [Features of implementing modern digital radio technologies in railway communication networks]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (1), 10–16 [in Ukrainian].
8. Honcharenko, V. I., Karlin, V., & Medvedev, Ya. (2018). *Edyna platforma dlia orhanizatsii tsyfrovoho tekhnolohichnoho radiozviazku standartu DMR* [A unified platform for the organization of digital technological radio communication based on the DMR standard]. *Ukrainska zaliznytsia*, (1–2), 20–26 [in Ukrainian].
9. Kustov, V. F., & Yelizarenko, A. O. (2026). *Normuvannia i vplyv zavod poizdnoho radiozviazku 2,13 i 2,15 MHz na porty zhyvlennia elektronnykh prystroiv STsB rivniv SIL $\frac{3}{4}$* [Standardization and influence of interference from train radio communication at 2.13 and 2.15 MHz on power supply ports of SIL $\frac{3}{4}$ railway signaling electronic devices]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, (216), 289–313 [in Ukrainian].
10. Yelizarenko, A. O. (2026). *Orhanizatsiia merezh poizdnoho radiozviazku v umovakh hirskei mistsevosti ta v tuneliakh zaliznyts* [Organization of train radio communication networks in mountainous areas and railway tunnels]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (1), 10–17 [in Ukrainian].
11. International Union of Railways. (2009). *GSM-R procurement & implementation guide* [in English].
12. European Telecommunications Standards Institute. (2007). *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol* (TS 102 361-1 V1.4.5) [in English].

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023, December 19). *Pro zatverdzhennia planu rozpodilu i korystuvannia radiochastotnym spektrom v Ukraini* [On approval of the plan for allocation and use of the radio frequency spectrum in Ukraine] (Resolution No. 1340). Verkhovna Rada of Ukraine.

13. TsSh-0047. (2007). *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia napravliaiuchykh linii (khvylevodiv) poizdnoho radiozviazku [Instructions for the technical maintenance of guiding lines (waveguides) of train radio communication]*. TOV "Shvydkiy rukh" [in Ukrainian].

Modernization of hectometer-range train radio communication networks. Yelizarenko Andriy

The introduction of mobile technological radio communication facilities on the railways of Ukraine began after the development of the first railway radio station ZHR-1, which operated in the hectometer range of radio waves. According to the Frequency Plan, two channels with a frequency of 2.13 and 2.15 MHz in the hectometer range with a radio wave length of 141 m were allocated for the organization of technological radio communication networks on railway transport.

The significant wavelength of hectometer range oscillations requires the use of extended linear antenna systems. The implementation of effective compact antennas in the GM range is difficult, especially for mobile and portable radio equipment in mobile radio communication networks on railway transport. The efficiency of locomotive antennas with a length of 7-12 m installed at a height of 0.8-1.0 m above the roof of the locomotive is 3-4 %. Significant levels of industrial radio interference require an increase in the level of useful signals with low efficiency of locomotive antennas. Thus, in the operating range of 2.13 MHz on sections electrified by alternating current, the minimum level of GM band signals is 72 dBmKv or more than 3000 mkV. The range of train radio communication channels of the hectometer range when using stationary antennas is only 4.2 km on sections of alternating current, which does not meet the requirements of the PTE.

When using guide lines, a waveguide wire or colored wires of longitudinal power supply, the range on sections of alternating current increases to 11.4 km. High-frequency signal excitation systems in the wires of 6.10 kV high-voltage lines create a voltage of 14.2 V. In order to reduce the impact on the characteristics of radio signals, automation power supplies are connected to the wires of the high-voltage line through blocking circuits. When the properties of the blocking circuits are degraded, the penetration of train radio signals causes a deterioration in the quality of communication and can create a dangerous source of electromagnetic interference for microprocessor automation devices, the voltage of which exceeds the standards for resistance to conductive interference (10 V). When using guide lines, operating costs increase. When using VHF radio equipment, the radio communication range can be up to 26 km for

sections with autonomous traction, up to 15.6 km on DC sections and up to 11.8 km on AC sections, which meets the requirements for organizing networks within railway sections. This is a convincing argument in favor of implementing linear VHF networks in the VHF range. Thus, the organization of linear VHF networks in the VHF range allows you to ensure compliance with the radio communication range conditions and ensure the implementation of modern digital networks in duplex mode, handover and other services of digital systems.

Keywords: railway technological radio communication, guide lines, radio communication range, modernization of railway networks.

Єлізаренко А. О., к.т.н., доцент кафедри транспортногo зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: elizarenko1@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Yelizarenko Andriy, Associate Professor of «Transport connection» department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: elizarenko1@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Стаття надійшла 24.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 23.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

ЗМІЙ С. О., к.т.н., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту),

КАЛАШНИК М. О., здобувачка 2 курсу, першого бакалаврського рівня, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту),

MELIKHOV Anatolii, Mipro OY, Tallinn, Estonia

Архітектура цифрової платформи мультимодальних пасажирських перевезень із подієвою інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі

Анотація. У статті розглянуто науково-прикладні аспекти побудови цифрової платформи мультимодальних пасажирських перевезень, орієнтованої на інтеграцію залізничного транспорту і сервісу таксі в межах єдиного інформаційного середовища. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення ефективності організації поїздок за схемою «від дверей до дверей», а також необхідністю забезпечення стійкості транспортної системи України в умовах воєнного стану та наслідків збройної агресії російської федерації. Визначено, що залізничний транспорт у мультимодальній системі виконує функцію магістрального регулярного сегмента, тоді як сервіс таксі забезпечує першу і останню милю та компенсує транспортні розриви, пов'язані зі зміною графіка руху поїздів. Метою статті є розроблення та наукове обґрунтування архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісу таксі, визначення складу даних, необхідних для їхньої інформаційної взаємодії, а також формалізація послідовності обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки. У роботі використано системний підхід, структурно-функціональний аналіз, метод архітектурної декомпозиції, а також елементи процесного та подієвого моделювання. У результаті дослідження визначено основні групи даних, які мають бути передані між залізничною підсистемою, сервісом таксі та цифровою платформою: довідкові, розкладні, геолокаційні, оперативні, подієві, транзакційні. Запропоновано архітектуру цифрової платформи, що включає рівень джерел даних, інтеграційний рівень, ядро мультимодальної оркестрації, прикладні сервіси і аналітичний контур. Розроблено механізм узгодження зміни часу руху поїзда із сегментом таксі у випадках непередбачуваних зупинок, затримок, зміни ЕТА та інших відхилень графіка. Для українських умов обґрунтовано доцільність інтеграції із сервісом таксі як інструмента адаптивного перепланування мультимодального маршруту. Наукова новизна роботи полягає в розробленні архітектурної моделі цифрової платформи, орієнтованої на подієву синхронізацію регулярного залізничного транспорту з гнучким сервісом таксі, а також у введенні показника надійності стикування мультимодальних сегментів для оцінювання стійкості маршруту. На відміну від відомих підходів, запропонована модель орієнтована не лише на маршрутний пошук, а на подієво-керовану оркестрацію мультимодальної поїздки з урахуванням динамічної зміни параметрів залізничного сегмента і адаптивного перепланування сервісу таксі. Практичне значення результатів полягає в можливості використання запропонованих рішень для створення цифрових платформ мультимодальної мобільності в Україні.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, цифрова платформа, залізничний транспорт, таксі, МaaS, інформаційна взаємодія, архітектура системи, обмін даними, реальний час.

Вступ

Цифрова трансформація транспортної галузі формує нові підходи щодо організації пасажирських перевезень, у яких пріоритет надано не окремому виду транспорту, а цілісній мобільності користувача. У межах такого підходу мультимодальні перевезення розглядають як форму організації поїздки, за якої пасажир послідовно використовує декілька видів

транспорту, а цифрові сервіси забезпечують узгоджене планування, бронювання, оплату і супровід маршруту [1, 2]. Особливого значення набуває інтеграція регулярних видів транспорту, насамперед залізничного, із гнучкими сервісами виклику таксі, що забезпечують першу та останню милю. Попри активний розвиток цифрових сервісів мобільності, наявні рішення переважно зосереджені або на

© ЗМІЙ С. О., КАЛАШНИК М. О., MELIKHOV Anatolii, Mipro OY. 2026

ізолюваному плануванні залізничних перевезень, або на автономному функціонуванні сервісів виклику автомобіля. Натомість недостатньо опрацьованими залишаються питання побудови інформаційно-керуючої платформи, здатної в реальному часі узгоджувати параметри регулярного залізничного сегмента і гнучкого сервісу таксі в межах єдиного мультимодального маршруту. Особливо це стосується сценаріїв, у яких необхідне оперативне перепланування поїздки внаслідок затримок, зміни ЕТА або інших подій, що порушують початкові умови стикування сегментів.

Залізничний транспорт є одним із базових елементів пасажирської мобільності завдяки високій провізній спроможності, енергоефективності та можливості організації регулярного міжміського і приміського сполучення [1, 3]. Водночас сервіси виклику таксі забезпечують персоналізований і гнучкий доступ до транспортної мережі, допомагають компенсувати відсутність прямого громадського сполучення, скорочують непродуктивний час доїзду до вокзалів і створюють додаткові умови доступності для різних категорій пасажирів. За таких умов формування мультимодального маршруту за схемою «таксі – поїзд – таксі» є логічним напрямом розвитку сучасних транспортних сервісів.

Для України зазначена проблематика має особливу актуальність. Унаслідок повномасштабної збройної агресії російської федерації транспортна система функціонує в умовах значної невизначеності, інфраструктурних пошкоджень, зміни транспортних потоків, обмежень авіасполучення та потреби в забезпеченні безперервної мобільності населення. У таких умовах залізничний транспорт фактично став системоутворюючим видом міжрегіонального пасажирського сполучення. Проте ефективність його використання значною мірою залежить від якості стикування із сервісами підвезення та вивезення пасажирів, насамперед із сервісами таксі. Додатковою складністю є те, що графік руху поїздів може змінюватися через непередбачувані зупинки, затримки, безпекові обмеження, аварійно-відновлювальні роботи або перевантаження транспортних вузлів. За таких умов цифрова система має не лише відображувати актуальний стан поїздки, а і забезпечувати динамічне перепланування мультимодального маршруту. За таких умов на перший план виходить не лише сервісна, а й інформаційно-керуюча складова мультимодальної мобільності. Ідеться про побудову платформи, яка забезпечує збір, синхронізацію, інтерпретацію та подієве опрацювання залізничних, геолокаційних і замовних даних, а також підтримує автоматизоване ухвалення рішень про корегування параметрів поїздки.

Концепція *Mobility as a Service* передбачає інтеграцію різних видів транспорту в єдину цифрову екосистему, де користувач отримує доступ до всієї логіки поїздки через один інтерфейс [2]. Однак на практиці залізничні системи, сервіси таксі, геоінформаційні сервіси і платіжні модулі зазвичай функціонують у різних інформаційних контурах, що ускладнює побудову цілісної моделі маршруту. Отже, науково-прикладна проблема полягає в розробленні такої архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень, яка забезпечувала б не лише інтеграцію різномірних джерел транспортних даних, а і подієво-керовану координацію мультимодальної поїздки в режимі реального часу. Розв'язання цієї проблеми потребує формалізації складу даних, визначення логіки міжсистемної взаємодії та побудови механізму адаптивного перепланування маршруту в разі відхилення залізничного сегмента від планових параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій і прикладній літературі мультимодальні перевезення визначають як інтегровані транспортні процеси, у межах яких використано переваги різних видів транспорту для досягнення кращих показників часу, доступності, вартості, стійкості маршруту [1]. У пасажирському секторі мультимодальність розглядають у зв'язку з концепцією *Mobility as a Service*, яка передбачає об'єднання планування, бронювання та оплати різних транспортних послуг у межах єдиної цифрової платформи [2].

У європейській практиці побудови цифрових транспортних платформ значну увагу приділяють стандартизації даних. Зокрема, для опису транспортних мереж, маршрутів, розкладів і тарифів використовують Transmodel, NeTEx і GTFS, а для передавання інформації реального часу - SIRI і GTFS-Realtime [3, 4]. Використання таких стандартів забезпечує інтероперабельність між різними операторами та цифровими сервісами.

Разом із тим сервіси виклику таксі та on-demand мобільності тривалий час розвивалися за власними платформними моделями, що базовані переважно на закритих API і комерційних екосистемах. Це ускладнює їх повноцінну інтеграцію в мультимодальні платформи. Сучасні ініціативи зі стандартизації on-demand mobility свідчать про прагнення наблизити сервіси таксі до транспортних систем регулярного типу через формалізацію структури даних, тарифів, статусів замовлення та подій [5].

Архітектурні підходи щодо побудови MaaS-платформ тяжіють до мікросервісної моделі, де дані

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

надходять від багатьох різномірних джерел, а взаємодія між модулями забезпечена через API-шлюзи, брокери повідомлень і сервіси оркестрації [6]. Для транспортних сервісів особливого значення набуває подієво-орієнтована обробка, оскільки реальна транспортна ситуація є динамічною і потребує оперативної реакції на зміни у стані маршруту [4, 7].

Більшість наявних досліджень зосереджена або на загальних принципах МaaS-платформ, або на стандартизації транспортних даних без деталізації логіки міжсегментного узгодження в конкретних мультимодальних сценаріях. Недостатньо розкритими залишаються питання координації регулярного залізничного сегмента із сервісами on-demand мобільності в умовах часової невизначеності, а також формалізованого оцінювання стійкості стикування сегментів маршруту.

Окремі дослідження демонструють важливість урахування реального часу під час оцінювання доступності транспортної системи. Дані про затримки, скасування та варіативність часу в дорозі можуть істотно змінювати сприйняття якості транспортного сервісу [7]. Це особливо актуально для маршруту, що містить стикування між залізницею і таксі, де будь-яка затримка поїзда здатна вплинути на життєздатність усього мультимодального сценарію.

Попри наявність значного масиву праць, недостатньо опрацьованими залишаються формалізація складу даних для інтеграції залізничного транспорту і сервісів таксі; побудова архітектури цифрової платформи, орієнтованої на взаємодію регулярного та on-demand сегментів; алгоритмічне забезпечення узгодження змін графіка руху поїздів із параметрами таксомоторного обслуговування; а також адаптація мультимодальних платформ до умов підвищеної ризиковості транспортного середовища.

Отже, існує потреба в розробленні архітектурної моделі цифрової платформи мультимодальних перевезень, яка б поєднувала регулярність залізничного руху, гнучкість сервісів таксі та подієво-керовані механізми реагування на відхилення.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою статті є розроблення та обґрунтування архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень із інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі, визначення складу даних, необхідних для їхньої інформаційної взаємодії, а також формалізація послідовності обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

- 1) проаналізовано особливості взаємодії залізничного транспорту і сервісів виклику таксі в межах мультимодальної пасажирської поїздки;
- 2) визначено склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії між залізничною підсистемою, сервісами таксі та цифровою платформою;
- 3) розроблено структурно-функціональну модель цифрової платформи мультимодальних перевезень;
- 4) сформовано структурну схему системи;
- 5) визначено послідовність обміну та обробки даних для сценаріїв мультимодальної поїздки за участю залізничного транспорту і таксі;
- 6) розроблено механізм узгодження зміни часу руху поїзда з параметрами сегмента таксі в умовах непередбачуваних зупинок, затримок і відхилень від графіка.

Методологія дослідження

Методологічною основою дослідження є системний підхід щодо розгляду мультимодальної поїздки як складної соціотехнічної системи, у межах якої взаємодіють транспортні оператори, цифрова платформа, користувачі, сервіси виклику таксі, платіжні та геоінформаційні сервіси. Застосування системного підходу дало змогу розглядати мультимодальну поїздку не як сукупність ізольованих транспортних операцій, а як цілісний процес із часовою, просторовою та інформаційною узгодженістю.

У дослідженні використано структурно-функціональний аналіз, що дав змогу виділити базові підсистеми цифрової платформи, визначити їхні функції і встановити характер інформаційних зв'язків між ними. Це допомогло перейти від описового рівня до побудови формальної архітектурної моделі цифрової платформи мультимодальних перевезень.

Для опису динаміки мультимодальної поїздки застосовано процесне моделювання, за допомогою якого формалізовано етапи ініціації маршруту, отримання даних, побудови маршрутних альтернатив, бронювання, супроводу в реальному часі, перепланування та завершення поїздки. Доповнення процесного підходу подієвим моделюванням дало змогу формалізувати реакцію системи на затримки поїздів, непередбачувані зупинки, зміну ETA, затримку подавання таксі та інші події, критичні для стійкості мультимодального маршруту.

Також використано метод архітектурної декомпозиції, за яким можна подати платформу як багаторівневу структуру, що охоплює зовнішні джерела даних, інтеграційний рівень, ядро оркестрації, прикладні сервіси та аналітичний контур.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Така декомпозиція забезпечує можливість логічного та функціонального розмежування компонентів системи, що є важливим для подальшої практичної реалізації.

Для оцінювання стійкості пересадки між залізничним і таксомоторним сегментами використано елементи формалізації часових залежностей, у межах яких введено коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів. Його застосування дає змогу перейти від якісного оцінювання ризику зриву маршруту до формалізованого критерію запуску механізму перепланування.

Отже, використана сукупність методів є адекватною поставленій меті дослідження та забезпечує необхідний науковий рівень обґрунтування запропонованої архітектури цифрової платформи мультимодальних перевезень.

Водночас дослідження має певні обмеження. Запропонована архітектурна модель має концептуально-прикладний характер і не передбачає повномасштабної програмної реалізації в межах цієї роботи. Уведені показники та логіка перепланування потребують подальшої експериментальної верифікації на реальних або наближених до реальних наборах транспортних даних.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз взаємодії залізничного транспорту і сервісів виклику таксі

Залізничний транспорт і сервіси виклику таксі мають різну організаційну та інформаційну природу. Залізнична система функціонує за нормативним розкладом і має високий ступінь регламентованості, тоді як таксі-сервіс є динамічним, попитузалежним і орієнтованим на індивідуалізоване обслуговування. Їхня інтеграція можлива лише за умови узгодження часових, просторових і подієвих параметрів.

У межах мультимодальної поїздки таксі може виконувати роль підвезення пасажирів до залізничної станції, вивезення зі станції після прибуття поїзда або обидві функції одночасно. Це дає змогу розглядати зв'язок «залізниця + таксі» як один із найбільш практичних сценаріїв реалізації door-to-door мобільності. Для такого сценарію основними є точність визначення часу прибуття пасажирів до станції, коректний розрахунок резерву пересадки, наявність даних реального часу про стан поїзда, доступність автомобіля таксі в потрібній локації та можливість оперативної зміни часу подавання. Загальну логіку інформаційної взаємодії між основними учасниками мультимодальної поїздки наведено на рис. 1.

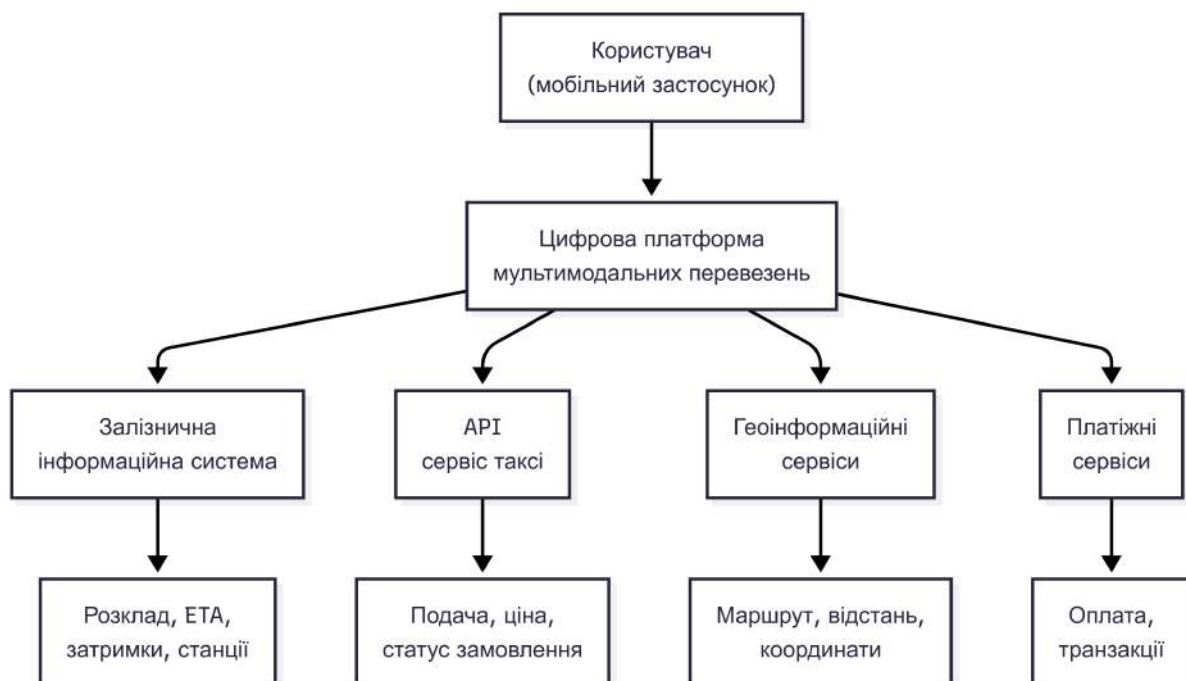


Рис. 1. Контекстна схема інформаційної взаємодії між користувачем, цифровою платформою, залізничною системою та сервісом таксі

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У реальних умовах інформаційна взаємодія між цими двома сегментами може бути реалізована як через попереднє планування, так і через супровід поїздки в реальному часі. Перший випадок передбачає побудову та бронювання маршруту на основі планового розкладу і прогнозованих параметрів таксі, другий – постійне оновлення параметрів маршруту відповідно до поточного стану транспортної системи.

Для України така взаємодія має посилене значення через структурну роль залізниці в умовах війни. Після початку повномасштабної агресії російської федерації залізничний транспорт став критично важливим засобом евакуації, внутрішньої мобільності, гуманітарного та міжнародного сполучення. Це призвело до зростання навантаження на вокзали, зміни графіків, збільшення кількості нестандартних операційних ситуацій. У таких умовах сервіси таксі можуть бути механізмом локального транспортного балансування, особливо у великих містах і навколо основних залізничних вузлів [8].

Отже, взаємодію залізниці і таксі потрібно розглядати не як допоміжний сервісний елемент, а як окрему предметну сферу цифрової інтеграції, що потребує спеціалізованої архітектури платформи.

Склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії

Ефективність інформаційної взаємодії між залізничним транспортом і сервісами таксі залежить від повноти, своєчасності та узгодженості обмінюваних даних. Для побудови цифрової платформи доцільно виокремити кілька груп даних (таблиця).

Основні групи даних цифрової платформи мультимодальних перевезень

Група даних	Джерело	Частота оновлення	Призначення
Довідкові залізничні дані	залізнична ІС	періодично	опис станцій, рейсів, платформ
Розкладні дані	залізнична ІС	за розкладом / у разі зміни	планування маршруту
Дані реального часу	залізнична ІС	подієво / у реальному часі	супровід і перепланування
Дані доступності таксі	API сервісу таксі	у реальному часі	оцінювання варіантів першої/останньої милі
Дані замовлення таксі	API сервісу таксі	подієво	супровід таксі-сегмента
Геодані	картографічні сервіси	у реальному часі / періодично	оцінювання часу доїзду та переміщення
Дані платформи	внутрішнє ядро	безперервно	оркестрація, журналювання, аналітика

Дані залізничної підсистеми

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

До складу залізничних даних належать довідкові дані, планові дані, дані реального часу та дані квиткового контексту.

До довідкових даних належать ідентифікатор поїзда, номер рейсу, категорія поїзда, ідентифікатор станції, назва станції, координати станції, опис зони посадки/висадки та інформація про платформу.

До планових даних належать запланований час відправлення, запланований час прибуття, послідовність станцій, нормативна тривалість стоянки, нормативний час пересадки та маршрут рейсу.

До даних реального часу належать фактичний час відправлення, фактичний час прибуття, поточна затримка, прогнозований час прибуття (ETA), повідомлення про непередбачувану зупинку, зміна колії або платформи, скасування або скорочення маршруту.

До даних квиткового контексту належать стан бронювання, наявність місць, статус квитка, клас обслуговування та особливі умови перевезення.

Дані сервісу виклику таксі

Для сервісу таксі, необхідні такі дані: доступності сервісу, поїздки, замовлення та подієві.

До даних доступності сервісу належать наявність автомобілів у зоні, середній час подавання, кількість доступних автомобілів, категорії автомобілів, доступність спеціалізованих автомобілів.

До даних поїздки належать точка посадки, точка висадки, орієнтовний час подавання, орієнтовний час у дорозі, вартість поїздки та рекомендований маршрут.

До даних замовлення належать ідентифікатор замовлення, статус замовлення, призначений водій, автомобіль, час прибуття водія, статус виконання замовлення та спосіб оплати.

До подієвих даних належать підтвердження замовлення, затримка подавання, перепризначення водія, скасування поїздки та завершення поїздки.

Дані цифрової платформи

Цифрова платформа формує власну інтегровану модель даних: ідентифікатор мультимодальної поїздки, модель маршруту,

конфігурація сегментів, часові резерви між сегментами, статус усієї поїздки, журнал подій, правила перепланування, узагальнений тариф, індекс надійності маршруту.

Отже, інформаційна взаємодія між залізничною і таксомоторною підсистемами має бути базована на багатокomпонентній інформаційній моделі, яка поєднує структурні, часові, геопросторові, транзакційні та подієві дані. Це дає змогу перейти від звичайної інтеграції довідкових сервісів до побудови платформи, яка здатна управляти мультимодальним маршрутом як цілісним цифровим об'єктом.

Архітектура цифрової платформи мультимодальних перевезень

Розроблення архітектури цифрової платформи має ґрунтуватися на таких принципах: модульність, масштабованість, API-орієнтованість, подієва синхронізація, відмовостійкість, підтримка реального часу та безпечне управління доступом.

Запропонована платформа складається з п'яти рівнів: джерел даних, інтеграційного, ядра мультимодальної оркестрації, прикладного і аналітичного. Запропонована архітектура допомагає локалізувати залежності від зовнішніх API, масштабувати високонавантажені сервіси незалежно, підтримувати подієве реагування, зберігати історію змін для аналітичної обробки та реалізовувати адаптивне перепланування без повної перебудови системи. На відміну від традиційних маршрутних сервісів, у яких інтеграція транспортних сегментів має переважно інформаційно-довідковий характер, запропонована архітектура орієнтована на керування повним життєвим циклом мультимодальної поїздки. Це передбачає не лише побудову маршруту, а і синхронізацію сегментів, подієве реагування на відхилення, повторне узгодження часових параметрів і накопичення історичних даних для подальшої аналітики.

Структурна схема системи цифрової платформи мультимодальних перевезень (рис. 2) відображає основні функціональні компоненти, інформаційні потоки та логіку взаємодії між зовнішніми джерелами даних і внутрішніми модулями платформи. На відміну від загальної архітектурної моделі, структурна схема деталізує прикладний склад системи і демонструє, через які підсистеми реалізована побудова, супровід, корегування та завершення мультимодальної поїздки.

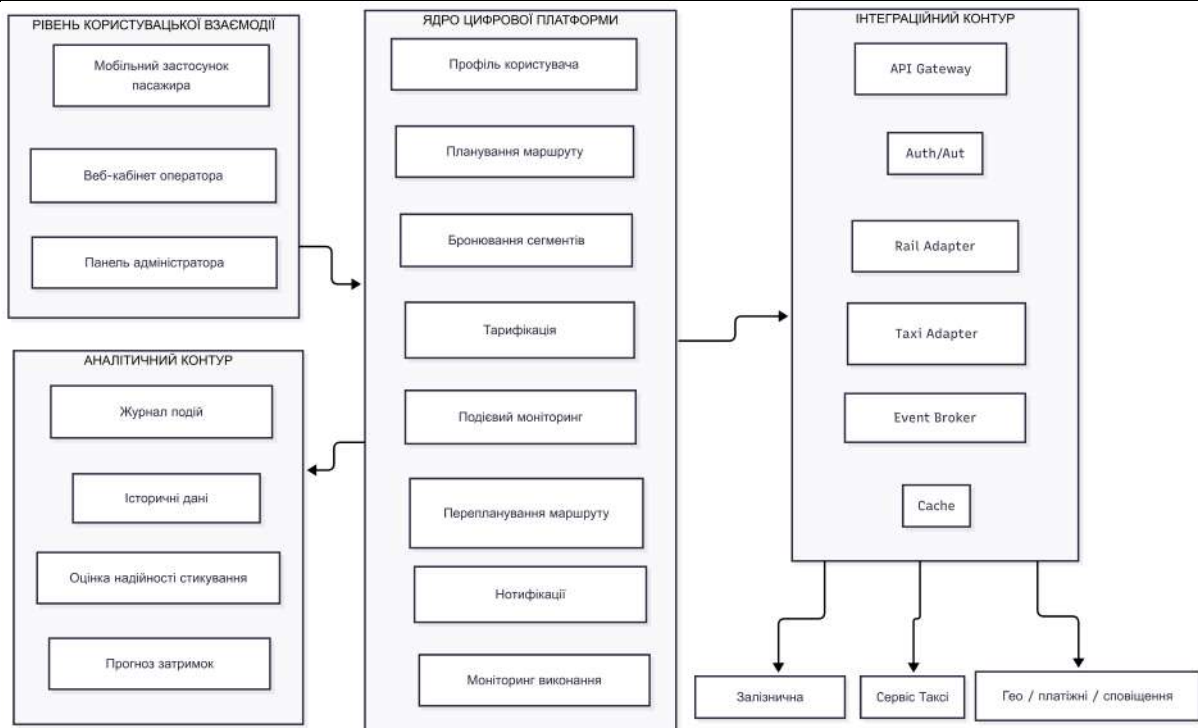


Рис. 2. Структурна схема системи цифрової платформи мультимодальних перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісу таксі

На рівні інтеграційного контуру реалізовано функції API Gateway, автентифікації та авторизації, адаптації залізничних даних, інтеграції із сервісом таксі, брокеризації подій і кешування оперативної інформації. Саме цей рівень забезпечує семантичне і технічне узгодження між різнорідними зовнішніми джерелами даних і внутрішніми модулями цифрової платформи.

Аналітичний контур системи призначений для накопичення історичних даних, журналювання подій, оцінювання надійності стикування та прогнозування затримок. Його наявність підвищує не лише операційну ефективність платформи, а і наукову значущість запропонованої моделі, оскільки дає змогу перейти від простого реагування на події до побудови предиктивних механізмів управління мультимодальними маршрутами.

Механізм узгодження зміни часу руху поїзда та інтеграція з таксі

Однією з головних особливостей запропонованої платформи є підтримка динамічного перепланування в разі зміни часу руху поїзда. Це особливо важливо для України, де внаслідок війни та пов'язаних із нею ризиків відхилення від графіка можуть бути спричинені як технологічними, так і безпековими факторами.

Після надходження події про відхилення від залізничної системи платформа має оновити ETA і

статус сегмента RailSegment, перерахувати часовий резерв між сегментами, оцінити ризик зриву пересадки та, якщо резерв стає критичним, ініціювати зміну параметрів TaxiSegment через Таксі Adapter. Схему узгодження зміни часу руху поїзда із замовленням таксі наведено на рис. 3.

Для формалізації моменту переходу від звичайного супроводу маршруту до режиму корегування доцільно використовувати коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів, який урахує наявний резерв часу, варіативність прибуття поїзда, час переміщення пасажирів в межах станції та варіативність подавання таксі.

$$K_{st} = \frac{T_{res}}{T_{rail_var} + T_{walk} + T_{taxi_var}}$$

де T_{res} – наявний резерв часу між сегментами;

T_{rail_var} – оцінена варіативність часу прибуття поїзда;

T_{walk} – час переміщення пасажирів від платформи до точки посадки в таксі;

T_{taxi_var} – варіативність часу подавання таксі.

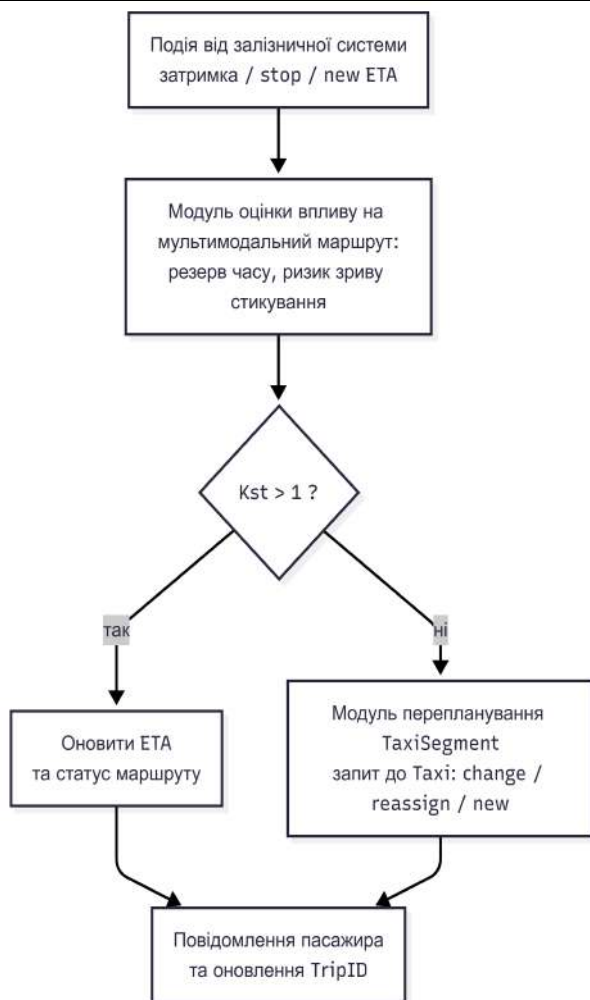


Рис. 3. Схема узгодження зміни часу руху поїзда із замовленням таксі в межах мультимодальної поїздки

Якщо $K_{st} > 1$, маршрут вважають стійким; якщо $K_{st} \leq 1$, необхідне перепланування.

Механізм узгодження починає діяти після надходження від залізничної системи події про затримку, зміну ETA, непередбачувану зупинку або інше порушення графіка. Для формалізації впливу відхилення від графіка на мультимодальний маршрут доцільно використовувати показник часової зміни залізничного сегмента

$$\Delta T_{rail} = T_{fact} - T_{plan},$$

де ΔT_{rail} – відхилення фактичного часу руху поїзда від планового;

T_{fact} – фактичний або оновлений прогнозований час прибуття;

T_{plan} – плановий час прибуття поїзда згідно з початковим розкладом.

Якщо $\Delta T_{rail} > 0$, поїзд прибуває із запізненням, що безпосередньо впливає на параметри наступного сегмента маршруту.

Отримана подія надходить до модуля оцінювання впливу на мультимодальний маршрут, де відбувається повторний аналіз часових параметрів пересадки. На цьому етапі система визначає, чи зберігається достатній резерв часу між прибуттям поїзда і запланованим сегментом таксі.

Резерв часу стикування між залізничним і таксомоторним сегментами може бути поданий як

$$T_{res} = T_{taxi}^{dep} - T_{rail}^{arr} - T_{move}$$

де T_{res} – резерв часу стикування;

T_{taxi}^{dep} – запланований час початку таксі-сегмента;

T_{rail}^{arr} – фактичний або прогнозований час прибуття поїзда;

T_{move} – час переміщення пасажирів від платформи до точки посадки в таксі.

Додатне значення T_{res} свідчить про наявність допустимого резерву, тоді як його зменшення вказує на зростання ризику зриву пересадки.

Якщо зміна часу руху поїзда не порушує допустимих меж стикування, система лише оновлює часові параметри маршруту та інформує користувача про зміну ETA. Якщо ж резерв стикування зменшується до критичного рівня, цифрова платформа ініціює процедуру корегування сегмента таксі. У межах інтеграції із сервісом таксі це може передбачати зміну часу подавання автомобіля, повторне підтвердження замовлення, перепризначення транспортного засобу або створення нового таксі-сегмента.

Сервіс таксі інтегрований у платформу не лише як джерело даних про доступність автомобілів і вартість поїздки, а як повноцінний учасник процесу динамічного перепланування мультимодального маршруту. Це допомагає узгоджувати регулярний залізничний сегмент із гнучким on-demand сервісом і підтримувати цілісність поїздки навіть за умов відхилення від початкового графіка.

Отже, механізм узгодження зміни часу руху поїзда та інтеграція з сервісом таксі забезпечують

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

адаптивність цифрової платформи мультимодальних перевезень. Саме цей механізм перетворює платформу з інструмента статичного планування на систему подієво-керованого управління поїздкою, здатну підтримувати стабільність мультимодального маршруту в умовах динамічної транспортної ситуації.

Послідовність обміну та обробки даних

Організація мультимодальної поїздки передбачає наскрізну послідовність інформаційних

взаємодій. Користувач задає параметри маршруту, платформа отримує дані від залізничної системи і таксі, будує маршрутні альтернативи, бронює, супроводжує поїздку в реальному часі та реагує на відхилення.

Послідовність обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки наведено на рис. 4.

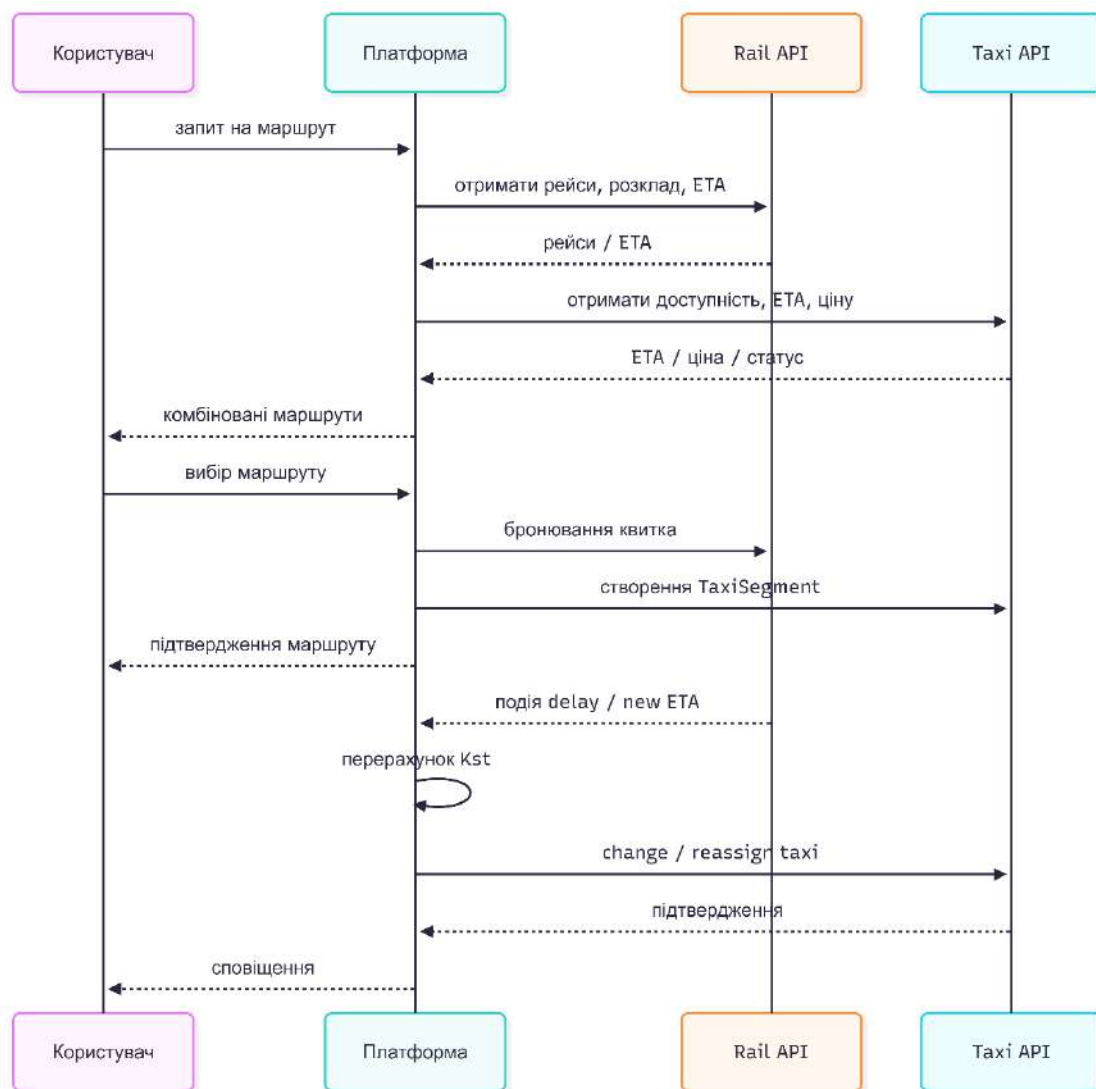


Рис. 4. Послідовність обміну даними для мультимодальної поїздки

«таксі – поїзд – таксі»

Послідовність обміну та обробки даних у цифровій платформі мультимодальних перевезень має забезпечувати безперервну інформаційну підтримку поїздки на всіх етапах її реалізації: від формування запиту до завершення маршруту. На відміну від

звичайних сервісів пошуку шляху, у цьому випадку платформа виконує функції координації транспортних сегментів, синхронізації часу пересадки, супроводу поїздки в реальному часі та адаптивного реагування на відхилення. У межах дослідження доцільно

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

виділити щонайменше три базові сценарії функціонування платформи: штатний сценарій планування поїздки; сценарій супроводу маршруту без критичних відхилень; сценарій подієвого перепланування в разі порушення параметрів стикування між сегментами. Таке виділення сценаріїв дає змогу чіткіше пов'язати архітектурні рішення з конкретними режимами функціонування системи.

На початковому етапі користувач через мобільний застосунок або вебінтерфейс задає основні параметри поїздки: початкову і кінцеву точки маршруту, бажаний час відправлення або прибуття, а також додаткові вимоги щодо вартості, доступності чи допустимого часу пересадки. Отриманий запит надходить до цифрової платформи, де його перевіряють, нормалізують адресу і формують внутрішню модель запиту.

Після цього платформа одночасно звертається до зовнішніх джерел даних. Із залізничної інформаційної системи отримують відомості про доступні поїзди, розклад руху, прогнозований час прибуття і відправлення, поточні затримки, станції та інші параметри залізничного сегмента. Через адаптер сервісу таксі надходять дані про доступність автомобілів, орієнтовний час подавання, вартість таксі-сегмента і прогнозований час поїздки. Додатково можуть бути залучені геоінформаційні сервіси для уточнення координат, відстаней і дорожньої ситуації.

На основі зібраних даних ядро мультимодальної оркестрації формує можливі маршрутні альтернативи за сценаріями «таксі – поїзд», «поїзд – таксі» або «таксі – поїзд – таксі». Для кожного варіанта розраховують сумарний час поїздки, вартість, часовий резерв пересадки, очікуваний рівень надійності, відповідність вимогам користувача. Після ранжування маршрутів користувачу пропонують найбільш доцільний набір альтернатив.

Для інтегрального оцінювання альтернативних маршрутів може бути використана узагальнена функція

$$Q = \alpha T_{mm} + \beta C_{mm} + \gamma N_{tr} + \delta \frac{1}{K_{st}}$$

де Q – інтегральна оцінка маршруту;

T_{mm} – загальний час поїздки;

C_{mm} – загальна вартість маршруту;

N_{tr} – кількість пересадок;

K_{st} – коефіцієнт надійності стикування;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти відповідних критеріїв.

Мінімізація значення Q дає змогу вибрати найбільш доцільний маршрут з урахуванням часу, вартості, кількості пересадок і стійкості стикування. Запропонована функція не претендує на універсальність, однак може бути використана як базовий критерій ранжування мультимодальних альтернатив у цифровій платформі. Значення вагових коефіцієнтів можна визначати залежно від пріоритетів користувача або політики сервісу.

Після вибору маршруту система переходить до етапу бронювання. Платформа надсилає запит до залізничної системи для підтвердження квитка або місця, а також формує замовлення в сервісі Таксі для відповідного сегмента поїздки. Після успішного підтвердження обидва транспортні сегменти об'єднуються в межах єдиного запису мультимодальної поїздки з присвоєнням індивідуального ідентифікатора. На цьому етапі користувач отримує підтвердження маршруту і основні параметри подальшого руху.

Після початку реалізації поїздки цифрова платформа переходить у режим супроводу в реальному часі. Вона відстежує статус замовлення таксі, оновлення даних про рух поїзда, фактичний і прогнозований час прибуття, а також подієві повідомлення про можливі відхилення. У цей період система безперервно оцінює, чи зберігається допустимий резерв стикування між сегментами маршруту.

У разі виникнення відхилення, зокрема затримки поїзда, непередбачуваної зупинки, зміни ЕТА або затримки подавання таксі, запускається механізм перепланування. Платформа виконує повторний розрахунок часових параметрів маршруту, оцінює ризик зриву пересадки та за потреби надсилає до сервісу таксі запит на зміну часу подавання, перепризначення автомобіля або формування нового таксі-сегмента. Одночасно користувач отримує повідомлення про зміну статусу маршруту і оновлені параметри подальшої поїздки.

Після завершення останнього транспортного сегмента система фіксує фактичний час виконання маршруту, статус усіх його складових і параметри відхилення від початкового плану. Ці дані передають до аналітичного контуру платформи, де використовують для оцінювання надійності маршруту, удосконалення правил перепланування та накопичення статистики для подальшого розвитку системи.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, послідовність обміну та обробки даних у цифровій платформі мультимодальних перевезень має циклічний і подієво-керований характер. Її особливістю є те, що обмін даними не обмежений стадією пошуку маршруту, а триває протягом усього життєвого циклу поїздки, забезпечуючи узгодження регулярного залізничного сегмента з гнучким сервісом таксі та підтримуючи стійкість мультимодального маршруту в умовах динамічних змін транспортної ситуації.

Обговорення результатів

Запропонована архітектура цифрової платформи відрізняється від типових маршрутних сервісів тим, що вона орієнтована не лише на пошук маршруту, а на повноцінну оркестрацію мультимодальної поїздки. Це означає підтримку логіки стикування, управління подіями, перепланування і аналітики після завершення маршруту. Порівняно з традиційними сервісами пошуку маршруту, у яких результатом є переважно статичний набір транспортних альтернатив, запропонована модель передбачає безперервний цикл супроводу поїздки з можливістю втручання в параметри окремих сегментів. Саме це забезпечує вищу адаптивність системи в умовах варіативності часу руху, що є критично важливим для українського транспортного середовища.

Наукова значущість запропонованого підходу полягає в поєднанні трьох компонентів: формалізації складу даних для взаємодії залізничної й таксі, розроблення архітектурної моделі платформи та введення критерію надійності стикування, який може бути використаний для автоматизованого ухвалення рішень. Водночас запропонований підхід має і певні обмеження. Зокрема, практична реалізація такої платформи залежить від доступності зовнішніх API, повноти даних реального часу, готовності перевізників до стандартизованого обміну даними та можливості інтеграції із сервісами on-demand мобільності. Крім того, введений коефіцієнт надійності стикування потребує подальшої емпіричної верифікації на реальних наборах даних.

Практична значущість полягає в можливості застосування цих рішень для цифрових платформ України, зокрема в умовах підвищеної нестабільності транспортного середовища, спричиненої війною. У таких умовах важливою є здатність системи адаптуватися до непередбачуваних зупинок, затримок і змін маршрутів. Інтеграція з таксі як національним сервісом таксі підвищує прикладну релевантність запропонованої моделі.

Висновки

У статті запропоновано та обґрунтовано архітектуру цифрової платформи мультимодальних

пасажирських перевезень з інтеграцією залізничних даних і сервісів таксі для умов динамічної зміни параметрів транспортного середовища.

За результатами проведеного дослідження отримано такі основні результати:

- встановлено, що інтеграція залізничного транспорту і сервісів виклику таксі є головною умовою забезпечення мультимодальної поїздки за схемою «від дверей до дверей»;
- визначено склад даних, необхідних для інформаційної взаємодії між залізничною підсистемою, сервісами таксі та цифровою платформою;
- розроблено архітектуру цифрової платформи мультимодальних перевезень;
- сформовано структурну схему системи, яка деталізує функціональні модулі цифрової платформи та інформаційні зв'язки між користувацьким рівнем, інтеграційним контуром, зовнішніми транспортними сервісами та аналітичним середовищем;
- визначено послідовність обміну та обробки даних для організації мультимодальної поїздки;
- запропоновано механізм узгодження зміни часу руху поїзда із сегментом таксі;
- введено коефіцієнт надійності стикування мультимодальних сегментів;
- показано, що в умовах України цифрові платформи мультимодальних перевезень повинні мати подієво-керований, адаптивний і відмовостійкий характер.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з математичним моделюванням ризиків зриву пересадки, побудовою прогностичних моделей затримок на основі історичних даних, а також розробленням цифрових двійників мультимодальних транспортних вузлів. Практичне впровадження запропонованих рішень доцільне у вигляді модульної цифрової платформи або надбудови над існуючими сервісами планування поїздок. Насамперед це стосується транспортних вузлів із високою роллю залізничного сполучення та значним попитом на сервіси першої й останньої милі.

Список використаних джерел

1. IRU. Multimodal transport: what it is and why it matters. URL: <https://www.iru.org/what-we-do/facilitating-trade-and-transit/different-types-freight-transport/multimodal-transport-what-it>
2. Urbanism Next. Mobility as a Service. URL: <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service>
3. MIA Platform. Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. URL: <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/>
4. Pysae. Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- URL: <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware>
5. MobilityData. Open standards for mobility data. URL: <https://mobilitydata.org/>
6. Open Data Hub. Architecture reference for scalable service platforms. URL: <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/>
7. ScienceDirect. Transit accessibility and real-time reliability assessment. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729>
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8>
9. European Commission. Multimodal journey planner and EU transport data approaches. URL: https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf
10. European Urban Mobility Observatory. Transforming suburban rail: RER-type systems. URL: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en
11. Transit App Resources. Ridehail and taxi integration perspectives. URL: <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi>
12. European Commission. Ukraine in motion: inclusive paths ahead. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., Orlovskaya, O. HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport problems*. 2022. Vol. 17, Iss. 1. P. 201-214. <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17>
14. Naumov, V., Nagorny, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54. <https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>
2. Urbanism Next. (n.d.). Mobility as a service. <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service> [in English]
3. MIA Platform. (n.d.). Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/> [in English]
4. Pysae. (n.d.). Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware. <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware> [in English]
5. MobilityData. (n.d.). Open standards for mobility data. <https://mobilitydata.org/> [in English]
6. Open Data Hub. (n.d.). Architecture reference for scalable service platforms. <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/> [in English]
7. ScienceDirect. (n.d.). Transit accessibility and real-time reliability assessment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729> [in English]
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8> [in English]
9. European Commission. (n.d.). Multimodal journey planner and EU transport data approaches. https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf [in English]
10. European Urban Mobility Observatory. (n.d.). Transforming suburban rail: RER-type systems. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en [in English]
11. Transit App Resources. (n.d.). Ridehail and taxi integration perspectives. <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi> [in English]
12. European Commission. (2025, September 12). Ukraine in motion: Inclusive paths ahead. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en [in English]
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., & Orlovskaya, O. (2022). HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport Problems*, 17(1), 201–214. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17> [in English]
14. Naumov, V., Nagorny, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54.

References

1. IRU. (n.d.). Multimodal transport: What it is and why it matters. <https://www.iru.org/what-we-do/facilitating-trade-and-transit/different-types-freight-transport/multimodal-transport-what-it> [in English]
2. Urbanism Next. (n.d.). Mobility as a service. <https://www.urbanismnext.org/technologies/mobility-as-a-service> [in English]
3. MIA Platform. (n.d.). Multimodal transport and data standards: NeTEx, GTFS and more. <https://mia-platform.eu/blog/multimodal-transport-netex-gtfs-data-standards/> [in English]
4. Pysae. (n.d.). Integrate GTFS Realtime and SIRI with bus fleet hardware. <https://www.pysae.com/content/article/integrate-gtfs-realtime-siri-bus-fleet-hardware> [in English]
5. MobilityData. (n.d.). Open standards for mobility data. <https://mobilitydata.org/> [in English]
6. Open Data Hub. (n.d.). Architecture reference for scalable service platforms. <https://opendatahub-io.github.io/models-as-a-service/0.0.1/architecture/> [in English]
7. ScienceDirect. (n.d.). Transit accessibility and real-time reliability assessment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214367X25000729> [in English]
8. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8> [in English]
9. European Commission. (n.d.). Multimodal journey planner and EU transport data approaches. https://transport.ec.europa.eu/document/download/76975a24-dd2a-4a0f-8f6f-35560822e1c7_en?filename=2011_09-multimodal-journey-planner.pdf [in English]
10. European Urban Mobility Observatory. (n.d.). Transforming suburban rail: RER-type systems. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/transforming-suburban-rail-case-study-rer-type-systems-european-metropolitan-areas_en [in English]
11. Transit App Resources. (n.d.). Ridehail and taxi integration perspectives. <https://resources.transitapp.com/article/403-ridehail-and-taxi> [in English]
12. European Commission. (2025, September 12). Ukraine in motion: Inclusive paths ahead. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en [in English]
13. Pshinko, O., Charkina, T., Martseniuk, L., & Orlovskaya, O. (2022). HUBs as a key tool for improving the quality of the service and development of multimodal passenger traffic. *Transport Problems*, 17(1), 201–214. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.17> [in English]
14. Naumov, V., Nagorny, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36(4), 43–54.

<https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>

[in English]

державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua.
<https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>

Abstract. The article addresses scientific and applied aspects of building a digital platform for multimodal passenger transportation focused on the integration of railway transport and taxi services within a unified information environment. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of door-to-door travel organization and to ensure the resilience of Ukraine's transport system under martial law and the consequences of the armed aggression of the Russian Federation. Railway transport is considered as the main line-haul regular segment of a multimodal trip, while taxi services provide first-mile and last-mile connectivity and compensate for transport gaps caused by train schedule disruptions. The purpose of the paper is to develop and scientifically substantiate the architecture of a digital platform for multimodal transportation integrating railway data and taxi services, to identify the data required for their information interaction, and to formalize the sequence of data exchange and processing required to organize a multimodal trip. The study applies a systems approach, structural-functional analysis, architectural decomposition, and elements of process and event-driven modeling. As a result, the main groups of data required for interaction between the railway subsystem, taxi services, and the digital platform are identified, including reference, timetable, geolocation, operational, event-driven, and transactional data. An architecture of the digital platform is proposed, including the data source layer, integration layer, multimodal orchestration core, application services, and an analytical layer. A special mechanism for coordinating train time changes with the taxi segment is developed for cases of unforeseen stops, delays, ETA changes, and other schedule disruptions. For Ukrainian conditions, integration with taxi services is substantiated as an adaptive replanning tool for multimodal routes. The scientific novelty lies in the development of an architectural model of a digital platform aimed at event-driven synchronization of regular railway transport with flexible taxi services, as well as in the introduction of a multimodal transfer reliability indicator for assessing route resilience. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed solutions to the development of digital multimodal mobility platforms in Ukraine.

Keywords: multimodal transportation, digital platform, railway transport, taxi, MaaS, information interaction, system architecture, data exchange, real-time.

Змій Сергій Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український

Калашник Меланія Олександрівна, здобувачка 2 курсу, першого бакалаврського рівня, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
<https://orcid.org/0009-0009-2525-6348>. Тел.: +380660257003. E-mail: melaniya.kalashnik@gmail.com.

Меліхов Анатолій Анатолійович, MIPRO OY, Таллінн, Естонія. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Тел.: +37256711666. E-mail: melikhov.anatoliy@gmail.com.

Zmii Serhii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>.

Kalashnyk Melaniia, 2nd-year student (Bachelor's level), Department of Automation and Computer-Aided Train Motion Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0009-2525-6348>. Тел.: +380660257003. E-mail: melaniya.kalashnik@gmail.com.

Melikhov Anatolii, Mipro OY, Tallinn, Estonia. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Тел.: +37256711666. E-mail: melikhov.anatoliy@gmail.com.

Стаття надійшла 31.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 22.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

СЕМЕНЕНКО Ю. О., к.т.н., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту),

СЕМЕНЕНКО О. Д., асистент,

РЯБЕНКОВ І. О., к.т.н., асистент,

СОРОКА А. С. студентка,

ШИРОКИЙ Ю. В., к.т.н., доцент

(Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»)

Дослідження кінематичних характеристик гібридних робототехнічних систем паралельно-последовної структури з додатковим кінематичним зв'язком

У статті розглянуто питання дослідження кінематичних характеристик гібридних робототехнічних систем паралельно-последовної структури з додатковим кінематичним зв'язком. Актуальність роботи обумовлена зростанням потреб сучасного виробництва у високопродуктивних роботизованих системах, здатних забезпечувати високу точність позиціонування, жорсткість конструкції та розширені функціональні можливості для виконання технологічних операцій в авіабудуванні, машинобудуванні, автомобілебудуванні та інших галузях. Маніпулятори паралельної структури мають високу вантажопідйомність, швидкодію і точність позиціонування виконавчого органа, але обмежену робочу область. Одним із перспективних напрямів усунення цього недоліку є використання гібридних структур, що поєднують переваги паралельних і последовних механізмів. Такі системи дають змогу збільшити робочу зону, зберігаючи високі показники жорсткості та динамічних характеристик.

У роботі досліджено гібридний маніпулятор паралельно-последовної структури, конструктивною особливістю якого є наявність додаткового пасивного кінематичного зв'язку. Використання додаткової ланки забезпечує зменшення згинальних навантажень на лінійні приводи і підвищення жорсткості конструкції під час переміщення об'єктів значної маси. Крім того, додатковий кінематичний зв'язок розширює технологічні можливості системи та може бути використаний для реалізації допоміжних функцій, зокрема підведення робочого середовища, енергії або встановлення додаткових функціональних модулів. У межах дослідження проаналізовано структуру маніпулятора і розроблено математичну модель для визначення його кінематичних характеристик. Розглянуто особливості розв'язання прямої та оберненої задач кінематики, визначено залежності між параметрами приводів і положенням вихідної ланки. Отримані результати можуть бути використані під час проектування та синтезу систем керування гібридними робототехнічними комплексами з підвищеними вимогами щодо точності та жорсткості.

Ключові слова: гібридний маніпулятор, паралельно-последовна структура, робототехнічна система, кінематичний аналіз, пряма задача кінематики, обернена задача кінематики, додатковий кінематичний зв'язок.

Вступ.

Останніми роками спостерігають активний розвиток гібридних робототехнічних систем, що пов'язано зі зростанням потреби у високошвидкісній і високоточній обробці великогабаритних виробів складної геометрії, зокрема елементів авіаційних конструкцій [1]. Застосування таких систем дає змогу підвищити продуктивність технологічних процесів і забезпечити необхідну точність виготовлення деталей.

На відміну від традиційних металорізальних верстатів, гібридні роботи мають підвищену гнучкість

і можливість адаптації до різних умов експлуатації. Залежно від технологічного завдання вони можуть бути встановлені як на стаціонарній, так і рухомій платформі, що розширює можливості їх практичного використання [2].

Конструктивно гібридні роботи формують поєднанням паралельних і последовних кінематичних механізмів. Паралельна частина системи забезпечує підвищену жорсткість, точність позиціонування та високі динамічні характеристики, тоді як последовна структура використовується для розширення функціональних можливостей і реалізації додаткових переміщень виконавчого органа.

©СЕМЕНЕНКО Ю. О., СЕМЕНЕНКО О. Д., РЯБЕНКОВ І. О., СОРОКА А. С. ШИРОКИЙ Ю. В., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Завдяки такому поєднанню вдається отримати систему, яка одночасно має значну робочу область, високу швидкість, точність і компактні габарити [3].

Подальше вдосконалення таких систем пов'язане із застосуванням додаткових кінематичних зв'язків, що допомагають змінювати кінематичну поведінку механізму, підвищувати стабільність руху, розширювати функціональні можливості, покращувати характеристики позиціонування. Однак введення додаткових зв'язків у структуру маніпулятора істотно ускладнює його кінематичний аналіз і потребує комплексного дослідження закономірностей руху, визначення робочих областей і оцінювання впливу конструктивних параметрів на ефективність функціонування системи.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження кінематичних характеристик маніпулятора паралельно-последовної структури з додатковим кінематичним зв'язком, спрямоване на встановлення взаємозв'язку між параметрами конструкції та кінематичними можливостями механізму, а також обґрунтування шляхів підвищення ефективності його використання в сучасних робототехнічних комплексах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасний розвиток робототехнічних систем спрямований на створення маніпуляторів, здатних поєднувати високу точність позиціонування, значну жорсткість конструкції та розширену робочу область. Одним із перспективних напрямів є використання маніпуляторів паралельно-последовної (гібридної) структури, які поєднують переваги последовних і паралельних кінематичних механізмів.

Паралельні та гібридні маніпулятори відрізняються замкненими кінематичними контурами, що забезпечує підвищення точності, зменшення деформацій і збільшення вантажопідйомності порівняно з традиційними последовними системами. Разом із тим така структура суттєво ускладнює кінематичний аналіз через необхідність одночасного врахування геометричних обмежень і взаємозв'язків між рухомими ланками [1].

Одним із перших відомих представників паралельних механізмів став робот Delta, розроблений Клавелем у 1985 році [4, 5]. Його конструкція забезпечила високу швидкість руху за відносно невеликої маси рухомих елементів. Подальший розвиток цієї концепції призвів до створення гібридних систем на основі Delta-механізму. Зокрема, було запропоновано промисловий робот Delta-RST із шістьма ступенями свободи, у якому паралельний механізм поєднаний із последовним зап'ястям [6]. Іншим напрямом розвитку стало доповнення Delta-структури двоступеневим последовним модулем, що

дало змогу реалізувати гібридного робота із п'ятьма ступенями свободи [7, 8].

Разом із тим використання механізмів Delta для силової обробки обмежено недостатньою жорсткістю і невеликою вантажопідйомністю [9]. Для усунення цих недоліків було розроблено інші типи гібридних роботів. Одним із найбільш успішних рішень став робот Tricept, у якому поєднано високожорсткий паралельний механізм із последовною частиною для орієнтації інструмента [10]. На основі цієї концепції були створені промислові модифікації Tricept T605, Tricept T805 і Tricept T9000, які знайшли широке застосування в авіабудуванні, машинобудуванні та обробці складнопрофільних деталей [1].

Подальшим розвитком цього напрямку стала поява робота Exechon, конструкція якого включає паралельний механізм типу 2UPR-1SPR і последовну дволанкову структуру [11–13]. Зменшення кількості пасивних з'єднань дало змогу покращити жорсткісні характеристики та підвищити точність обробки [14]. Також були запропоновані інші варіанти гібридних систем, серед яких TriVariant, Georg V і п'ятиосові гібридні оброблювальні комплекси [15–17].

Незважаючи на значний прогрес у розробленні гібридних роботів, задача високоточної обробки великогабаритних деталей із підвищеною твердістю залишається актуальною. Одним із сучасних рішень став робот TriMule, який складається з паралельного механізму з трьома ступенями свободи та двоступеневого последовного зап'ястя [18, 19].

Порівняно з існуючими конструкціями типу Tricept та Exechon робот TriMule має меншу кількість обертових шарнірів, що сприяє підвищенню жорсткості конструкції та забезпечує кращу точність обробки важкооброблюваних матеріалів. При цьому ефективність роботи такої системи визначена не лише її структурною схемою, але і точністю керування активними приводами, що безпосередньо впливає на якість формування траєкторії руху виконавчого органа.

Останні дослідження також спрямовані на застосування додаткових кінематичних зв'язків і структурної надлишковості для покращення експлуатаційних характеристик маніпуляторів. Введення додаткового кінематичного зв'язку дає змогу збільшити жорсткість конструкції, покращити траєкторну точність і розширити допустимі режими руху виконавчого органа. Проте такі рішення призводять до ускладнення математичних моделей і потребують додаткового дослідження впливу конструктивних параметрів на кінематичні характеристики системи.

Отже, аналіз наукових джерел показав, що питання дослідження кінематичних характеристик

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

маніпуляторів паралельно-послідовної структури з додатковим кінематичним зв'язком залишається актуальним. Незважаючи на значний обсяг робіт у сфері кінематичного аналізу гібридних механізмів, недостатньо дослідженим залишається вплив додаткових кінематичних зв'язків на робочу область, маніпулятивність і особливі положення механізму, що визначає необхідність проведення подальших досліджень.

Визначення мети та задачі досліджень

Існуючі конструктивні рішення маніпуляторів паралельно-послідовної структури дають змогу забезпечити поєднання високої точності позиціонування, підвищеної жорсткості конструкції та достатньо великої робочої області. Разом із тим подальше вдосконалення таких механізмів пов'язане із введенням додаткових кінематичних зв'язків, які впливають на характер руху виконавчого органа, змінюють геометричні співвідношення між ланками та ускладнюють математичний опис механізму.

На відміну від класичних механізмів паралельно-послідовної структури, у яких геометричні осі виконавчих ланок перетинаються в одній точці, у досліджуваній конструкції маніпулятора з додатковим кінематичним зв'язком таке перетинання відсутнє. Це призводить до появи додаткових геометричних обмежень і не дає змогу безпосередньо використовувати відомі методики кінематичного аналізу, розроблені для традиційних триподних механізмів.

Для забезпечення ефективного функціонування нового механізму необхідно встановити закономірності переміщення його робочого органа, визначити взаємозв'язок між зміною узагальнених координат і положенням вихідної ланки, а також оцінити вплив додаткового кінематичного зв'язку на кінематичні можливості маніпулятора.

Особливістю досліджуваного механізму є наявність надлишковості кінематичної структури, коли кількість керованих параметрів перевищує кількість незалежних координат положення виконавчого органа. Це створює можливість підвищення маневреності та розширення робочої області, однак одночасно потребує проведення детального кінематичного аналізу.

Метою дослідження є аналіз кінематичних характеристик маніпулятора паралельно-послідовної структури з додатковим кінематичним зв'язком через розроблення його кінематичної моделі, визначення закономірностей переміщення робочого органа та дослідження особливостей позиціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання дослідження**:

1. Побудувати кінематичну модель механізму і визначити систему узагальнених координат.

2. Розв'язати пряму задачу кінематики і встановити залежності між параметрами виконавчих ланок і координатами робочого органа.

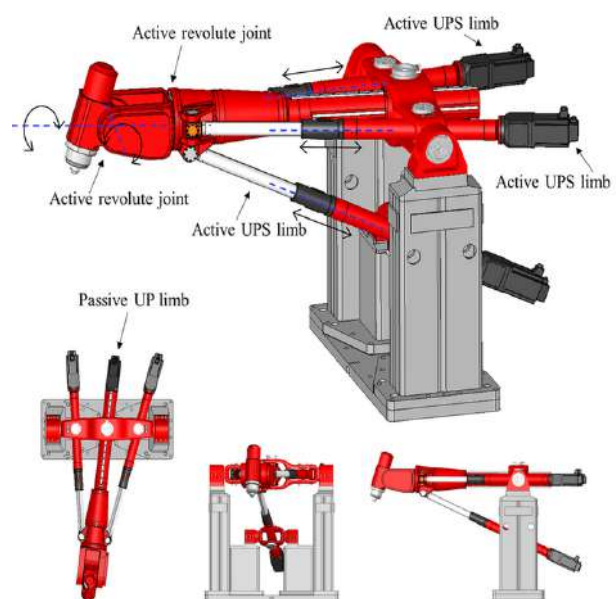
3. Розв'язати обернену задачу кінематики для визначення параметрів механізму за заданого положення виконавчого органа.

4. Розв'язати задачу позиціонування та визначити можливість забезпечення переміщення робочого органа в задану точку робочої області.

Отримані результати дослідження можуть бути використані для подальшого вдосконалення математичних моделей і методів аналізу маніпуляторів паралельно-послідовної структури.

Основна частина

Перспективним напрямом розвитку робототехнічних систем є застосування маніпуляторів паралельно-послідовної (гібридної) структури. Такі механізми являють собою поєднання паралельних і послідовних кінематичних ланцюгів, які здійснюють відносний рух за рахунок обертальних або поступальних кінематичних пар. Основною особливістю таких маніпуляторів є можливість поєднання переваг механізмів послідовної та паралельної структури. Наявність паралельних кінематичних контурів забезпечує підвищення жорсткості конструкції, вантажопідйомності, точності позиціонування та швидкодії, тоді як послідовні ланки сприяють розширенню робочої зони та підвищенню маневреності виконавчого органу.



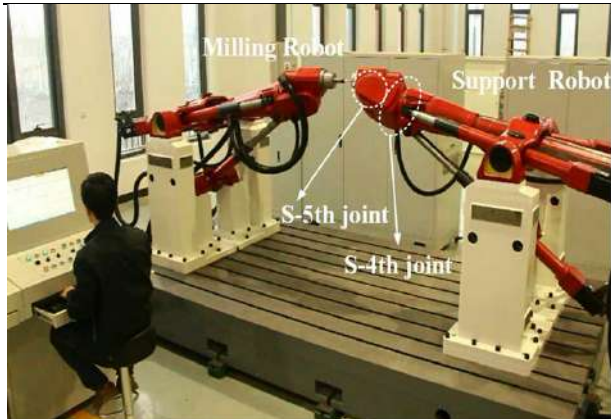


Рис. 1. Гібридний робот TriMule паралельно-последовної структури [19]

На рис. 1 показано модульний робот TriMule, який може бути змонтований або на рухомій платформі або нерухомій основі відповідно до конкретних виробничих потреб. Як видно, триступеневий паралельний механізм призначений для виконання поступальних рухів за допомогою трьох активних ланок UPS та однієї пасивної ланки UP. Тут U, P і S позначають універсальне з'єднання, призматичне з'єднання та сферичне з'єднання відповідно. Серводвигуни з гвинтовими парами використовують для приведення в рух активних призматичних з'єднань. Двоступеневий зап'ясток призначений для виконання двох обертових рухів за допомогою двох активних обертових з'єднань. Серводвигуни з редукторами використовують для приведення в рух активних обертових з'єднань. На кінці послідовної обертової головки може бути встановлений спеціальний пристрій, такий як фреза, опорний блок.

Для розв'язання поставлених задач, пов'язаних із дослідженням кінематичних характеристик і визначенням переміщень виконавчих приводів, необхідно встановити закони руху виконавчих ланок маніпулятора під час переміщення робочого органа за заданою програмною траєкторією.

Під час побудови структурної та кінематичної моделі маніпулятора прийнято такі припущення:

- усі ланки механізму розглядають як абсолютно тверді тіла;
- пружні елементи конструкції в процесі роботи вважають недеформованими;
- елементи конструкції, що забезпечують кінематичні зв'язки між ланками, приймають абсолютно жорсткими і такими, що не змінюють своїх геометричних параметрів під час руху.

За прийнятих припущень механізм маніпулятора описують як просторову систему

абсолютно твердих тіл, рух яких обмежений голономними стаціонарними кінематичними зв'язками.

Конструкція досліджуваного маніпулятора паралельно-последовної структури без урахування поворотної основи складається з дванадцяти кінематичних пар п'ятого класу і трьох сферичних шарнірів, які відповідають кінематичним парам третього класу (рис. 2).

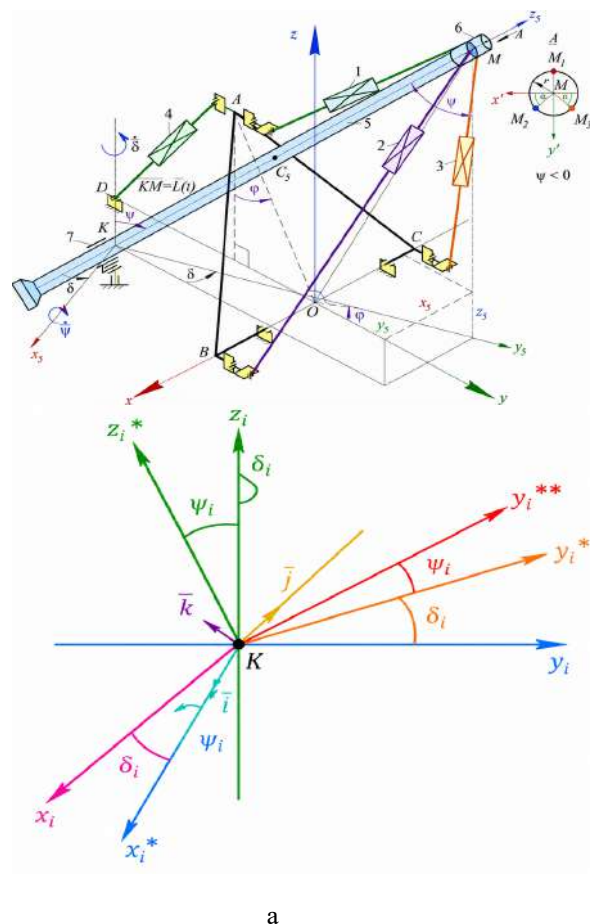


Рис. 2. Схема маніпулятора паралельно-последовної структури з додатковим зв'язком: а – кінематична схема; б – схема для визначення напрямних косинусів рухомих осей координат

Розглянутий маніпулятор із додатковим кінематичним зв'язком утворений системою із дванадцяти твердих тіл, які здійснюють різні типи механічного руху. Трикутна основа механізму (ланка ABC) виконує обертовий рух відносно нерухомої осі. Ланка AD, що відповідає штоку лінійного привода, здійснює плоскопаралельне переміщення. Просторовий рух реалізують ланки KM, AM₁, BM₂ і CM₃, положення яких визначено взаємодією виконавчих приводів і додаткового кінематичного зв'язку.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Під час формування конструктивної схеми маніпулятора задають основні геометричні параметри механізму, зокрема координати точок кріплення на поворотній основі та розміри основних структурних елементів (OA, OB, OC, OD, DK), які визначають конфігурацію робочої області та кінематичні можливості механізму.

Прийнята структурна модель є базою для подальшого розв'язання прямої та оберненої задач кінематики, а також аналізу процесу позиціонування робочого органа маніпулятора.

Головним структурним показником маніпулятора є кількість ступенів рухомості. Ця характеристика визначає мінімальну кількість незалежних параметрів, необхідних для повного опису конфігурації кінематичного ланцюга [9].

Кількість ступенів рухомості розраховується за виразом

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, (1)$$

де n – кількість рухомих ланок;

p_i – кількість кінематичних пар i -го класу.

Для маніпулятора паралельно-последовної структури (без урахування поворотної основи) кількість ступенів рухомості становить

$$W = 6n - 5p_5 - 3p_3 = 6 \cdot 12 - 5 \cdot 12 - 3 \cdot 3 = 3 \quad (2)$$

Отже, без поворотної основи маніпулятор має три ступені рухомості, а з урахуванням поворотної основи – чотири ступені рухомості.

$$\begin{pmatrix} a_{11i} = \cos \delta_i & a_{12i} = \sin \delta_i & a_{13i} = 0 \\ a_{21i} = -\cos \psi_i \sin \delta_i & a_{22i} = \cos \psi_i \cos \delta_i & a_{23i} = \sin \psi_i \\ a_{31i} = \sin \psi_i \sin \delta_i & a_{32i} = -\sin \psi_i \cos \delta_i & a_{33i} = \cos \psi_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для четвертого ланцюга $\delta_4 = 0$.

Пряма та обернена задачі кінематики маніпулятора паралельно-последовної структури з додатковим зв'язком

Основними завданнями, які має виконувати маніпулятор, є переміщення робочого органа заданою траєкторією та забезпечення проведення технологічних операцій. Саме тому під час кінематичного синтезу маніпулятора пріоритетним є розв'язання двох основних задач відносно положення вихідної ланки — прямої та оберненої.

Пряма задача кінематики полягає у визначенні декартових координат характерної точки вихідної

Важливим параметром, що характеризує конструктивні можливості маніпулятора, є його маневреність. Під маневреністю розуміють різницю між кількістю ступенів рухомості виконавчого механізму та кількістю узагальнених координат об'єкта маніпулювання. Її також можна визначити як кількість ступенів рухомості, що залишаються у виконавчого механізму після фіксації захвату.

Для розглянутого маніпулятора-трипода з додатковим зв'язком маневреність дорівнює 1 (за умови, що кількість ступенів рухомості становить три, а кількість узагальнених координат – чотири).

Для опису положення ланок маніпулятора в просторі вводять системи координат (рухомі та нерухомі). Абсолютна система координат $Oxyz$ жорстко пов'язана з нерухомою основою. Рухомі системи координат $x_i y_i z_i$ ($i=1 \dots 5$) пов'язані з корпусами кожного лінійного привода та порожнистою трубою 5. Початок кожної рухомої системи збігається з точкою кріплення відповідного ланцюга.

Орієнтацію кожної рухомої системи координат $x_i y_i z_i$ ($i = 1 \dots 5$) відносно абсолютної системи $Oxyz$ визначають двома кутами: кутом δ_i (поворот навколо осі z_i , паралельної осі Oz) і кутом ψ_i (поворот навколо осі x_i^*). Орієнтація в просторі не залежить від порядку виконання цих поворотів (рис. 2, б)).

Матриця напрямних косинусів має такий вигляд:

ланки маніпулятора за відомими значеннями узагальнених координат [11]. У такий спосіб встановлюють траєкторію руху вихідної ланки відповідно до заданих законів руху приводних ланок.

Обернена задача кінематики — це математична задача, яка полягає у знаходженні узагальнених координат маніпулятора (які визначають його просторову конфігурацію) за відомими декартовими координатами характерної точки вихідної ланки. Завдяки цьому визначають закони переміщення приводних ланок відповідно до заданого руху вихідної ланки. Розв'язання оберненої задачі є критично важливим етапом для забезпечення точного позиціонування.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Як узагальнені координати qs ($s = 1...4$) маніпулятора можна прийняти довжини виконавчих ланок у системі l -координат [12]: $q_1 = l_1(t)$, $q_2 = l_2(t)$, $q_3 = l_3(t)$, $q_4 = l_4(t)$.

У системі l -координат положення твердого тіла в просторі описано чотирма довжинами відрізків l_1, l_2, l_3, l_4 , що з'єднують точки тіла з точками нерухомої основи, утворюючи при цьому геометрично незмінну структуру. На відміну від класичних рівнянь руху з використанням кутів Ейлера, рівняння в системі l -координат описують рух тіла виключно через лінійні величини.

Для забезпечення керованості та отримання аналітичних виразів для розв'язання прямої задачі кінематики доцільно також задавати узагальнені координати qs ($s = 1...4$) у системі координат додаткової ланки. У цьому випадку узагальненими координатами є змінна довжина відрізка порожнистої труби $q_1 = KM(t) = L(t)$; кути $q_2 = \psi_5(t)$, $q_3 = \delta_5(t)$, що визначають орієнтацію рухомої системи координат $Kx_5y_5z_5$ відносно нерухомої $Oxyz$; кут повороту $q_4 = \varphi(t)$ поворотної основи маніпулятора ABC .

Як характерну точку вихідної ланки маніпулятора вибираємо точку $M(x_M(t), y_M(t), z_M(t))$. Для отримання аналітичних виразів прямої та оберненої задач кінематики необхідно встановити геометричні співвідношення між декартовими координатами точки M в абсолютній системі $Oxyz$ та узагальненими координатами маніпулятора.

Розв'язання оберненої задачі кінематики у випадку задавання конфігурації маніпулятора в системі l -координат

Положення точки M на вихідній ланці 6 визначено координатами x_M , y_M , z_M відносно нерухомої системи координат $Oxyz$. Залежності між декартовими координатами точок кріплення виконавчих ланок на вихідній ланці в абсолютній системі координат $Oxyz$ та довжинами ланок мають вигляд

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{x_{M_1}^2 + (y_{M_1} - y_A)^2 + (z_{M_1} - z_A)^2} \\ l_2(t) &= \sqrt{(x_{M_2} - OB)^2 + y_{M_2}^2 + z_{M_2}^2} \\ l_3(t) &= \sqrt{(x_{M_3} + OC)^2 + y_{M_3}^2 + z_{M_3}^2} \\ l_4(t) &= \sqrt{(y_A - y_D)^2 + z_A^2} \end{aligned} \quad (4)$$

де OB , OC , y_D — геометричні параметри поворотної основи і точок її кріплення.

Оскільки координати точки A є однозначними функціями кута повороту основи φ , то вирази для y_A та z_A мають вигляд

$$y_A = -OA \sin \varphi, z_A = OA \cos \varphi. \quad (5)$$

Формули переходу від координат вектора в рухомій системі координат до координат відносно нерухомої системи мають вигляд [13]

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \alpha_{11i} x_i^* + \alpha_{21i} y_i^* + \alpha_{31i} z_i^*, \\ y &= y_0 + \alpha_{12i} x_i^* + \alpha_{22i} y_i^* + \alpha_{32i} z_i^*, \\ z &= z_0 + \alpha_{13i} x_i^* + \alpha_{23i} y_i^* + \alpha_{33i} z_i^*, \end{aligned} \quad (6)$$

де x , y , z — координати вектора в абсолютній системі;

x_i^* , y_i^* , z_i^* — координати вектора в рухомій системі;

x_0 , y_0 , z_0 — координати початку рухомої системи;

α_{11i} — напрямні косинуси.

Проекції вектора $\overline{OM}_1 = \overline{OM} + \overline{MM}_1$, визначені виразами

$$\begin{aligned} x_{M_1} &= x_M + \alpha_{115} x_{M_1}^* + \alpha_{215} y_{M_1}^* + \alpha_{315} z_{M_1}^* = x_M + r \cos \psi_5 \sin \delta_5 \\ y_{M_1} &= y_M + \alpha_{125} x_{M_1}^* + \alpha_{225} y_{M_1}^* + \alpha_{325} z_{M_1}^* = y_M - r \cos \psi_5 \cos \delta_5 \\ z_{M_1} &= z_M + \alpha_{135} x_{M_1}^* + \alpha_{235} y_{M_1}^* + \alpha_{335} z_{M_1}^* = z_M - r \sin \psi_5 \end{aligned} \quad (7)$$

Підставляючи вирази (5) і (7) у формулу (4), отримуємо вираз для $l_1(t)$:

$$l_1^2(t) = x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + OA^2 - 2y_M r \cos \psi_5 \cos \delta_5 - 2OA \sin \varphi (r \cos \psi_5 \cos \delta_5 - y_M) - 2z_M r \sin \psi_5 + 2OA \cos \varphi (r \sin \psi_5 - z_M) \quad (8)$$

Аналогічно для інших ланок визначають проєкції векторів $\overline{OM}_2 = \overline{OM} + \overline{MM}_2$, на нерухому систему координат, а потім — проєкції векторів $\overline{MM}_2$, на осі рухомих систем

$$\begin{aligned} x_{M_2} &= x_M + \alpha_{11i} x_{M_2}^* + \alpha_{21i} y_{M_2}^* + \alpha_{31i} z_{M_2}^* = x_M + r \cos \delta_5 \cos \alpha - r \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha, \\ y_{M_2} &= y_M + \alpha_{12i} x_{M_2}^* + \alpha_{22i} y_{M_2}^* + \alpha_{32i} z_{M_2}^* = y_M + r \sin \delta_5 \cos \alpha + r \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha, \\ z_{M_2} &= z_M + \alpha_{13i} x_{M_2}^* + \alpha_{23i} y_{M_2}^* + \alpha_{33i} z_{M_2}^* = z_M + r \sin \psi_5 \sin \alpha, \end{aligned} \quad (9)$$

Після підстановки у формулу (4) отримують вирази

$$l_2^2(t) = (x_M - OB)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + 2z_M r \sin \psi_5 \sin \alpha + 2r(x_M - OB) (\cos \delta_5 \cos \alpha - \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha) + 2ry_M (\sin \delta_5 \cos \alpha \sin \psi_5 + \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha) \quad (10)$$

координат можуть бути записані через відповідні співвідношення

$$\begin{aligned} \text{Координати вектора } \overline{OM}_3 &= \overline{OM} + \overline{MM}_3, \text{ у нерухомій системі} \\ x_{M_3} &= x_M + a_{11} x_{M_3}^* + a_{21} y_{M_3}^* + a_{31} z_{M_3}^* = x_M - r \cos \delta_5 \cos \alpha - r \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha, \\ y_{M_3} &= y_M + a_{12} x_{M_3}^* + a_{22} y_{M_3}^* + a_{32} z_{M_3}^* = y_M - r \sin \delta_5 \cos \alpha - r \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha, \\ z_{M_3} &= z_M + a_{13} x_{M_3}^* + a_{23} y_{M_3}^* + a_{33} z_{M_3}^* = z_M + r \sin \psi_5 \sin \alpha, \end{aligned} \quad (11)$$

Підставляючи вирази (11) у рівняння (4), отримуємо залежність для визначення довжини ланок

Далі, після підстановки виразу (5) у рівняння (4) і врахування умови $y_D = -OD$, отримуємо довжину ланки:

$$l_3^2(t) = (x_M - OC)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2r(x_M - OB) (\cos \delta_5 \cos \alpha + \cos \psi_5 \sin \delta_5 \sin \alpha) + 2ry_M (-\cos \alpha \sin \delta_5 + \cos \psi_5 \cos \delta_5 \sin \alpha) + 2z_M r \sin \psi_5 \sin \alpha, \quad (12)$$

$$l_4(t) = \sqrt{(OA \sin \varphi - OD)^2 + OA^2 \cos^2 \varphi} \quad (13)$$

Кути орієнтації ланки $KM = L(t)$, а саме функції $\psi_5(t), \delta_5(t)$, визначають через просторові координати точки M відповідно до співвідношень

$$\begin{aligned}\sin \delta_5 &= -\frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}, \sin \psi_5 = -\sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}}, \\ \cos \delta_5 &= -\frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}, \cos \psi_5 = -\frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}},\end{aligned}\quad (14)$$

Після підстановки залежностей (14) у точки вихідної ланки. У такий спосіб отримують рівняння (8), (10) і (12) остаточно формують залежності довжин ланок (15)–(17). аналітичні вирази для узагальнених координат маніпулятора через декартові координати характерної

$$\begin{aligned}l_1^2(t) &= x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + OA^2 - \frac{2ry_M(z_M + DK)(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} - \\ &- 2OA \left(\frac{r(z_M + DK)(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \right) \sin \varphi + 2z_M r \cdot \\ &\sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} - 2OA \left(r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} + z_M \right) \cos \varphi,\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}l_2^2(t) &= (x_M + OB)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha + 2r(x_M + OB) \\ &\left(\frac{(y_M + OD) \cos \alpha \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} + (z_M + DK)x_M \sin \alpha}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \right) + \\ &+ 2ry_M \left(\frac{-x_M \cos \alpha \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} + (z_M + DK)(y_M + OD) \sin \alpha}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \right),\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}l_3^2(t) &= (x_M + OC)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha - 2r(x_M + OC) \\ &\left(\frac{(y_M + OD) \cos \alpha \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} - (z_M + DK)x_M \sin \alpha}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \right) + \\ &+ 2ry_M \left(\frac{x_M \cos \alpha \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} + (z_M + DK)(y_M + OD) \sin \alpha}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \right),\end{aligned}\quad (17)$$

Для четвертого виконавчого механізму після перетворення рівняння (4) з урахуванням співвідношення (5) маємо

$$l_4^2(t) = (OD - OA \sin \varphi)^2 + OA^2 \cos^2 \varphi. \quad (18)$$

У результаті були визначені чотири аналітичні залежності для узагальнених координат привідних механізмів: $l_1(t)$, $l_2(t)$, $l_3(t)$, $l_4(t)$.

Проведений аналіз прямої та оберненої задач кінематики для маніпуляторів із l -координатною структурою показав, що розв'язання оберненої задачі кінематики є відносно нескладним і допускає отримання аналітичних залежностей. Водночас задача прямої кінематики для таких механічних систем значно складніша і в загальному випадку не завжди має замкнений аналітичний розв'язок.

Отримані закони зміни узагальнених координат можуть бути використані для подальшого

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

дослідження процесів позиціонування та визначення траєкторії переміщення вихідної ланки маніпулятора. Для розглянутої конструкції маніпулятора паралельно послідовній структурі побудова повного аналітичного розв'язку прямої задачі кінематики є складною та потребує застосування чисельних методів.

Розв'язання прямої задачі кінематики у випадку задавання конфігурації маніпулятора в системі координат додаткової ланки

Якщо як узагальнені координати вибрати кути $\psi(t)$, $\delta(t)$, $\varphi(t)$ і довжину $KM = L(t)$, тоді розв'язання прямої задачі кінематики можна подати як (рис. 1)

$$\begin{aligned}x_M &= L \sin \psi_5 \sin \delta_5, \\y_M &= -OD - L \sin \psi_5 \cos \delta_5, \\z_M &= -DK + L \cos \psi_5.\end{aligned}\quad (19)$$

Розв'язання оберненої задачі кінематики визначено такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}g\psi_5 &= -\frac{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}{(z_M + DK)}, \\tg\psi_5 &= -\frac{x_M}{y_M + OD}, \\L &= \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}.\end{aligned}\quad (20)$$

Оптимальне значення кута повороту трикутної основи φ встановлюють розв'язанням задачі позиціонування.

Розв'язання задачі позиціонування

Після отримання розв'язків прямої та оберненої задач кінематики наступним етапом дослідження є визначення положення маніпулятора у просторі, тобто розв'язання задачі позиціонування.

Суть цієї задачі полягає у визначенні узагальнених координат маніпулятора (l_{1n} , l_{2n} , l_{3n} , l_{4n}) за відомої початкової конфігурації (l_{10} , l_{20} , l_{30} , l_{40}), що відповідає нульовому положенню системи. У цьому положенні довжини виконавчих ланок 1–3 є мінімальними, а кут повороту основи становить $\varphi = 0$. Необхідно забезпечити досягнення заданих координат характерної точки вихідної ланки $M(x_{Mn}, y_{Mn}, z_{Mn})$ у глобальній системі координат (рис. 2).

Для визначення шуканої конфігурації використовують співвідношення, отримані під час розв'язання оберненої задачі кінематики в системі (I)-координат (вирази (15)–(18)). Оскільки кількість узагальнених координат маніпулятора дорівнює

чотирьом, а положення характерної точки визначено лише трьома декартовими координатами, система має одиничну маневреність. Це означає, що задача позиціонування належить до класу оптимізаційних.

Процедура позиціонування передбачає два послідовні етапи. Спочатку переміщують вихідну точку маніпулятора $M_0(x_{M0}, y_{M0}, z_{M0})$ із початкової конфігурації у стартову точку траєкторії $M_n(x_{Mn}, y_{Mn}, z_{Mn})$. Далі протягом інтервалу часу τ переміщують від початкової точки до кінцевої точки траєкторії $M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$.

Для розв'язання задачі позиціонування та однозначного визначення конфігурації маніпулятора існує декілька критеріїв оцінювання якості керування рухом [14], які застосовують за відсутності додаткових обмежень на допустимі значення узагальнених координат. Розглянемо алгоритм, у якому початкову нульову конфігурацію маніпулятора вважають заздалегідь відомою. Також заданими є координати початкової $M_n(x_{Mn}, y_{Mn}, z_{Mn})$ і кінцевої точок $M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$, тоді як необхідно визначити лише відповідні положення ланок маніпулятора в зазначених точках.

Під час розроблення конструкцій робототехнічних систем необхідно враховувати реальні конструктивні обмеження, які визначають допустимі межі зміни координат і безпосередньо пов'язані з допустимими значеннями узагальнених координат маніпулятора (q_s), де $s = 1 \dots 4$, а також із необхідністю уникнення взаємного зіткнення ланок. Такі обмеження задають нерівністю $q_{min} \leq q \leq q_{max}$.

Для маніпулятора, наведеного на рис. 2, задача позиціонування має оптимізаційний характер, що пояснюють наявністю надлишкового ступеня рухливості. Оскільки кількість узагальнених координат системи дорівнює чотирьом, а положення характерної точки вихідної ланки визначено лише трьома декартовими координатами, маневреність системи становить одиницю. У зв'язку з цим для однозначного визначення конфігурації необхідно сформулювати додаткову умову оптимізації [15].

Процес позиціонування маніпулятора під час виконання технологічних операцій передбачає послідовне переміщення робочого органа: спочатку з вихідної нульової конфігурації до початкової точки траєкторії, яка визначена координатами $M_0(x_{M0}, y_{M0}, z_{M0})$, а далі — до кінцевої точки $M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$.

Отже, якщо нульова конфігурація маніпулятора, що описана узагальненими координатами (l_{10} , l_{20} , l_{30} , l_{40}), є відомою, необхідно спочатку визначити початкову конфігурацію системи — значення (l_{1n} , l_{2n} , l_{3n} , l_{4n}), а потім забезпечити переміщення вихідної ланки до кінцевого положення, яке має координати (l_{1k} , l_{2k} , l_{3k} , l_{4k}).

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Алгоритм розв'язання задачі позиціонування складається з кількох послідовних етапів.

На першому етапі маніпулятор перебуває у вихідному положенні, яке визначено кутом повороту основи ($\varphi = 0$) і мінімальними довжинами виконавчих ланок 1–3, що задані координатами (l_{10} , l_{20} , l_{30} , l_{40}). Координати початкової точки вихідної ланки $M_0(x_{M0}$, y_{M0} , z_{M0}), від якої починається рух, визначають за залежностями (15)–(18).

Після цього задають координати початкової точки траєкторії $M_n(x_{Mn}$, y_{Mn} , z_{Mn}) і кінцевої точки $M_k(x_{Mk}$, y_{Mk} , z_{Mk}), до якої необхідно перемістити вихідну ланку.

Довжини другого ($l_2(t)$) і третього ($l_3(t)$) виконавчих елементів визначають однозначно за співвідношеннями (16) і (17), оскільки залежать виключно від декартових координат заданих точок траєкторії.

Натомість довжини першого ($l_1(\varphi)$) і четвертого ($l_4(\varphi)$) виконавчих елементів є функціями кута повороту основи і можуть змінюватися в допустимих межах відповідно до встановлених геометричних обмежень за фіксованого положення точок $M_k(x_{Mk}$, y_{Mk} , z_{Mk}).

Умову визначення конфігурації маніпулятора за відомих координат характерної точки вихідної ланки можна сформулювати мінімізацією функції критерію узагальнених енергетичних витрат [16]:

$$\Phi(\varphi) = C_1 [l_{1n}(\varphi) - l_{10}]^2 + C_4 [l_{4n}(\varphi) - l_{40}]^2, \quad (21)$$

з урахуванням обмежень у вигляді нерівностей

$$\varphi_{\min} \leq \varphi^* \leq \varphi_{\max}, \quad (22)$$

де C_1 і C_4 — вагові коефіцієнти;

$\varphi_{\min}$, $\varphi_{\max}$ — відповідно мінімально та максимально допустимі значення кута повороту основи маніпулятора-трипода;

φ^* — оптимальне значення кута повороту.

Значення вагових коефіцієнтів C_1 і C_4 вибирають відповідно до енергетичних або силових витрат, необхідних для зміни відповідних узагальнених координат. Для тих координат, зміна яких потребує більших зусиль, доцільно призначити більші значення вагових коефіцієнтів [17]. У межах

цього дослідження вплив величини вагових коефіцієнтів окремо не аналізують, тому для спрощення математичної моделі їх приймають сталими.

Функція (21) характеризує критерій мінімізації зміни довжин виконавчих ланок із переміщенням характерної точки вихідної ланки в декартовому просторі. Використання квадратичного критерію обумовлене зручністю визначення оптимального розв'язку та простотою математичної реалізації.

Умови (22) задають допустимий діапазон зміни параметрів виконавчих ланок (11) і (14). У такому випадку цільову функцію Лагранжа можна записати як [18]

$$\Phi^* = C_1 (l_{1n} - l_{10})^2 + C_4 (l_{4n} - l_{40})^2 + \lambda_1 (u_1^2 + \varphi^* - \varphi_{\max}) + \lambda_2 (u_2^2 + \varphi_{\min} - \varphi^*), \quad (23)$$

де u_1^2 , u_2^2 — допоміжні змінні;

λ_1 , λ_2 — множники Лагранжа.

Необхідна умова існування мінімуму функції (23) задана співвідношенням

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi} = C_1 \frac{\partial (l_{1n} - l_{10})^2}{\partial \varphi} + C_4 \frac{\partial (l_{4n} - l_{40})^2}{\partial \varphi} + \lambda_1 - \lambda_2 = 0. \quad (24)$$

Достатньою умовою досягнення мінімуму є додатне значення другої похідної цільової функції:

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial \varphi^2} \right)_{\varphi(\varphi)=0}. \quad (25)$$

Оскільки функція Лагранжа (23) є опуклою, а множники Лагранжа задовольняють умови $\lambda_1 \geq 0$, $\lambda_2 \geq 0$, то виконання необхідних умов автоматично забезпечує достатність отриманого розв'язку.

Спільне розв'язання рівнянь (8), (13) і (24) допомагає визначити оптимальне значення кута повороту основи φ_n , а також відповідні значення довжин виконавчих ланок (11) і (14) і множників Лагранжа λ_1 , λ_2 .

У випадку отримання декількох допустимих розв'язків для φ_n остаточний вибір роблять підстановкою знайдених значень у функціонал (21) і подальшим порівнянням отриманих результатів оптимізації.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Під час переміщення вихідної ланки від точки $M_n(x_{Mn}, y_{Mn}, z_{Mn})$ до точки $M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$ використовують аналогічний алгоритм визначення

положення. Загальну структуру алгоритму позиціонування наведено на рис. 3.



Рис. 3. Структурна схема алгоритму розв'язання задачі позиціонування маніпулятора

Для розрахунку кінематичних характеристик маніпулятора як виконавчих ланок вибрано лінійні електроактуатори *LINAK LA33* (рис. 4) із максимальним робочим ходом 600 мм, швидкістю до 70 мм/с і робочим навантаженням до 5000 Н. Розглянемо практичну реалізацію запропонованого підходу для маніпулятора паралельно-послідовної структури з додатковим зв'язком з урахуванням обмежень на зміну довжин актуаторів.

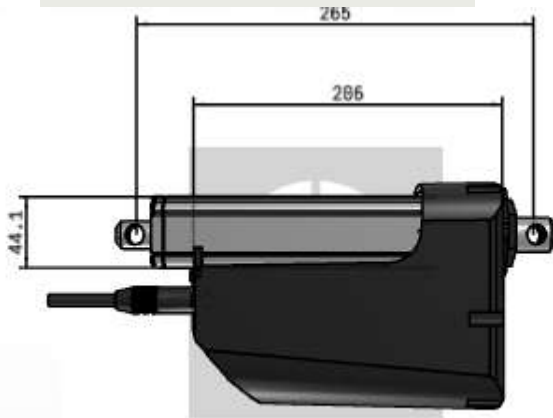


Рис. 4. Лінійний електроактуатор LINAK LA33 [19]

Спочатку маніпулятор перебуває в нульовому положенні, де вихідна ланка зафіксована в точці M_0 з координатами $x_{M0} = 0$ мм, $y_{M0} = 730$ мм, $z_{M0} = 85$ мм. У цьому положенні довжини виконавчих ланок 1–3 мають мінімальні значення: $l_{10} = 765$ мм, $l_{20} = 768$ мм, $l_{30} = 770$ мм, кут повороту основи ABC становить $\varphi_0 = 0^\circ$, а довжина четвертої ланки з урахуванням геометричних параметрів дорівнює $l_{40} = 755$ мм.

Далі задаємо координати початкової точки M_n вихідної ланки: $x_{Mn} = 110$ мм, $y_{Mn} = 860$ мм, $z_{Mn} = 460$ мм. Із виразів (16) і (17) однозначно визначають відповідні довжини ланок $l_{2n} = 975$ мм і $l_{3n} = 1025$ мм. Потім з умови мінімуму квадратичної функції (24) з урахуванням обмежень обчислюють кут повороту основи ABC $\varphi_n = -0,18$ рад ($\approx -10,3^\circ$). Після цього визначають довжини виконавчих ланок $l_{1n} = 815$ мм і $l_{4n} = 805$ мм для відповідної конфігурації маніпулятора.

Розрахункові значення узагальнених координат l_1, l_2, l_3, l_4 мають лежати в межах конструктивних обмежень механізму та актуаторів ($l_{smin} \leq l_s \leq l_{smax}$) і проходити перевірку на відповідність геометричним параметрам конструкції.

Аналогічно задачу позиціонування розв'язують із переміщенням вихідної ланки з початкової точки $M_n(x_{Mn}, y_{Mn}, z_{Mn})$ у кінцеву точку $M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$.

Числові результати розв'язання задачі позиціонування з урахуванням нульового, початкового та кінцевого положень наведено в таблиці.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Розрахункові значення координат і узагальнених координат маніпулятора паралельно-послідовної структури з додатковим зв'язком

Параметр	Значення в нульовому положенні	Значення в початковій точці	Значення в кінцевій точці
Координати характерної точки М (x_M, y_M, z_M).	$x_{M0} = 0$ мм $y_{M0} = 730$ мм $z_{M0} = 85$ мм	$x_{Mn} = 100$ мм $y_{Mn} = 850$ мм $z_{Mn} = 442$ мм	$x_{Mk} = -100$ мм $y_{Mk} = 950$ мм $z_{Mk} = 600$ мм
Узагальнені координати l_1, l_2, l_3, l_4	$l_{10} = 765$ мм $l_{20} = 768$ мм $l_{30} = 770$ мм $l_{40} = 755$ мм	$l_{1n} = 815$ мм $l_{2n} = 975$ мм $l_{3n} = 1025$ мм $l_{4n} = 805$ мм	$l_{1k} = 870$ мм $l_{2k} = 1185$ мм $l_{3k} = 1145$ мм $l_{4k} = 875$ мм
Узагальнені координати L, ψ, δ, φ	$L_0 = 1405$ мм $\psi_0 = -1,40$ $\delta_0 = 0$ $\varphi_0 = 0$	$L_n = 1630$ мм $\Psi_n = -1,19$ $\Delta_n = -0,08$ $\varphi_n = -0,18$	$L_k = 1795$ мм $\psi_k = -1,12$ $\delta_k = 0,07$ $\varphi_k = -0,43$

Додатково були розраховані значення узагальнених координат маніпулятора в системі координат додаткової ланки L, ψ, δ , а також з урахуванням раніше визначеного кута повороту поворотної основи φ . Отримані параметри в системі координат додаткової ланки можуть бути використані в подальшому для складання математичної моделі динаміки маніпулятора.

Отже, задача позиціонування для маніпулятора паралельно-послідовної структури з додатковим зв'язком успішно розв'язана. Наразі відомі початкові та кінцеві значення конфігурації маніпулятора.

На наступному етапі виконують кінематичний синтез, тобто визначають закони зміни узагальнених координат під час переміщення характерної точки вихідної ланки з початкового положення в кінцеве за заданий проміжок часу τ відповідно до запрограмованої траєкторії.

Подальші дослідження передбачатимуть розв'язання прямої задачі кінематики в аналітичній формі, динамічний аналіз маніпулятора з урахуванням інерційних і гравітаційних навантажень, а також розроблення алгоритмів оптимального керування з метою підвищення точності позиціонування, швидкодії та енергетичної ефективності системи. Отримані результати створюють надійну основу для практичної реалізації прототипу маніпулятора та його випробувань у реальних умовах.

Висновки.

У статті досліджено кінематичні характеристики маніпулятора паралельно-послідовної структури з додатковим кінематичним зв'язком. Розроблено та проаналізовано кінематичну схему маніпулятора, встановлено його ступені рухомості з урахуванням поворотної основи. Розв'язано пряму та обернену задачі кінематики для різних способів задавання узагальнених координат. Показано, що з поданням у системі l -координат обернена задача кінематики має аналітичне розв'язання, тоді як пряма задача реалізована чисельно. Для системи координат додаткової ланки отримано аналітичні розв'язки як прямої, так і оберненої задач кінематики, що підвищує зручність їх використання для задач керування та подальшого динамічного моделювання.

Розв'язано задачу позиціонування вихідної ланки маніпулятора на основі встановлених кінематичних залежностей, що допомагає визначати положення та орієнтацію робочого органу за заданими узагальненими координатами. Досліджено особливі положення механізму, за яких виникають виродження кінематичних характеристик і можливі неконтрольовані зміни параметрів вихідної ланки. Сформовано аналітичні вирази керуючої матриці, що дає змогу пов'язати швидкості приводів із швидкостями узагальнених координат, що допомагає аналізувати вплив приводів і оцінювати наближення до сингулярних конфігурацій.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отримані результати формують основу для подальших досліджень у напрямі синтезу законів керування та динамічного аналізу маніпуляторів паралельно-послідовної структури, а також визначають перспективні напрями їх використання для технологічних процесів з обробки складних поверхонь в авіаційній і машинобудівній галузях.

Список використаних джерел

1. Olazagoitia, J. L., & Wyatt, S. (2007). New PKM Tricept T9000 and its application to flexible manufacturing at Aerospace Industry. *SAE Technical Paper*, 2007-01-3820. DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-3820>
2. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Семененко, Ю. О., Семененко, О. Д., Ковальов, М. П., & Сорока, А. С. (2025). Дослідження кінематичних характеристик дельта-робота в задачах прямої та зворотної кінематики. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 106, 121–141. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.08>
3. Li, Q. C., Xu, L. M., Chen, Q. H., & Ye, W. (2017). New family of RPR-equivalent parallel mechanisms: Design and application. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(2), 217–221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0045-0>
4. Milutinović, M., Slavković, N., & Milutinović, D. (2013). Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool. *FME Transactions*, 41(1), 1–10. URL: <https://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/fme/vol41>
5. Семененко, Ю. О., & Семененко, О. Д. (2025). Особливості локалізації та навігації мобільних роботів на основі лазерного SLAM. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей VII Міжнар. наук.-практ. конф.*, 244. Львів: Національний університет «Львівська політехніка».
6. Костюк, Г. І., Баранов, О. О., & Широкий, Ю. В. (2020). Конструювання промислових роботів: навчальний посібник. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 135 с. URL: <https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/7676>
7. Liu, N., & Wu, J. J. (2014). Kinematics and application of a hybrid industrial robot-delta-RST. *Sensors & Transducers*, 169(4), 186–192. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?doi=f5ab7c3e88da6a48bfe1d2f89b458468d3157fb&repid=rep1&type=pdf>
8. Широкий, Ю. В., & Постельник, Т. О. (2021). *Конструювання устаткувань для автоматизованого виробництва. Захватні пристрої промислових роботів: навчальний посібник*. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 88 с. URL: <https://dspace.library.khai.edu/>
9. Wu, Y., Fu, Z., Xu, J. N., Yan, W. X., Liu, W. H., & Zhao, Y. Z. (2015). Kinematic analysis of 5-DOF hybrid parallel robot. *Intelligent Robotics and Applications: 8th International Conference, ICIRA 2015*, 153–163. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22876-1_14
10. Баранов, О. О., Руденко, Н. В., & Широкий, Ю. В. (2021). Математичні основи робототехнічних систем: навчальний посібник. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 224 с. URL: <https://library.khai.edu/>
11. Семененко, Ю. О., Сисоєв, Ю. О., Семененко, О. Д., Степаненко, Д. Р., Сорока, А. С., & Широкий, Ю. В. (2026). Енергоефективні алгоритми обробки сенсорної інформації для наземних роботизованих систем різного призначення. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 31(2), 53–68. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i2.362229>
12. Petko, M., Karpel, G., Gac, K., Góra, G., Kobus, K., & Ochoński, J. (2016). Trajectory tracking controller of the hybrid robot for milling. *Mechatronics*, 37, 100–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.012>
13. Семененко, Ю. О., & Семененко, О. Д. (2025). Аналіз можливості керування дельта-роботом за допомогою PID-регулятора. *Тези 38-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, 2–3. Харків: УкрДУЗТ. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/dodatok_do_zhurnalu_ikszt_3_2025.pdf
14. Zahedi, A., Shafei, A., & Shamsi, M. (2023). Application of hybrid robotic systems in crop harvesting: Kinematic and dynamic analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107724>
15. Droukas, L., Doulgeri, Z., Tsakiridis, N. L., Triantafyllou, D., Kleitsiotis, I., Mariolis, I., Giakoumis, D., Tzovaras, D., Kateris, D., & Bochtis, D. (2023). A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01793-z>
16. Staicu, S. (2018). Kinematics and dynamics of a hybrid parallel manipulator. In *Dynamics of Parallel Robots*, 309–326. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99522-9_12
17. Modak, S., & Rama Krishna, K. (2024). Kinematics and singularity analysis of a novel hybrid industrial manipulator. *Robotica*, 42, 579–610. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574723001662>
18. Zhang, J., Zhao, Y. Q., & Jin, Y. (2016). Elastodynamic modeling and analysis for an Exechon parallel kinematic machine. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(3), 031011. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4030938>
19. Jin, Y., Bi, Z. M., Liu, H. T., Higgins, C., Price, M., Chen, W. H., & Huang, T. (2015).

Kinematic analysis and dimensional synthesis of Exechon parallel kinematic machine for large volume machining. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), 041004. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029499>

References

1. Olazagoitia, J. L., & Wyatt, S. (2007). New PKM Tricept T9000 and its application to flexible manufacturing at Aerospace Industry. *SAE Technical Paper*, 2007-01-3820. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3820> [in English].
2. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Semenenko, Yu. O., Semenenko, O. D., Kovalov, M. P., & Soroka, A. S. (2025). Doslidzhennia kinematychnykh kharakterystyk delta-robotu v zadachakh priamoi ta zvorotnoi kinematyky [Investigation of kinematic characteristics of a delta robot in forward and inverse kinematics problems]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 106, 121–141. <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.08> [in Ukrainian].
3. Li, Q. C., Xu, L. M., Chen, Q. H., & Ye, W. (2017). New family of RPR-equivalent parallel mechanisms: Design and application. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(2), 217–221. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0045-0> [in English].
4. Milutinović, M., Slavković, N., & Milutinović, D. (2013). Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool. *FME Transactions*, 41(1), 1–10. <https://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/fme/vol41> [in English].
5. Semenenko, Yu. O., & Semenenko, O. D. (2025). Osoblyvosti lokalizatsii ta navihatsii mobilnykh robotiv na osnovi lazernoho SLAM [Features of localization and navigation of mobile robots based on laser SLAM]. *Quality Management in Education and Industry: Experience, Problems and Prospects: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*, 244. Lviv: Lviv Polytechnic National University. [in Ukrainian].
6. Kostyuk, H. I., Baranov, O. O., & Shyrokyi, Yu. V. (2020). *Konstruiuvannia promyslovykh robotiv: navchalnyi posibnyk [Design of industrial robots: Textbook]*. Kharkiv: National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», 135 p. <https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/7676> [in Ukrainian].
7. Liu, N., & Wu, J. J. (2014). Kinematics and application of a hybrid industrial robot-delta-RST. *Sensors & Transducers*, 169(4), 186–192. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?doi=f5ab7c3e88da_d6a48bfe1d2f89b458468d3157fb&repid=rep1&type=pdf [in English].
8. Shyrokyi, Yu. V., & Postelnyk, T. O. (2021). *Konstruiuvannia ustakuvannia dlia avtomatyzovanoho vyrobnytstva. Zakhvatni prystroi promyslovykh robotiv: navchalnyi posibnyk [Design of equipment for automated production. Gripping devices of industrial robots: Textbook]*. Kharkiv: National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», 88 p. <https://dspace.library.khai.edu/> [in Ukrainian].
9. Wu, Y., Fu, Z., Xu, J. N., Yan, W. X., Liu, W. H., & Zhao, Y. Z. (2015). Kinematic analysis of 5-DOF hybrid parallel robot. In *Intelligent Robotics and Applications: 8th International Conference, ICIRA 2015*, 153–163. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22876-1_14 [in English].
10. Baranov, O. O., Rudenko, N. V., & Shyrokyi, Yu. V. (2021). *Matematychni osnovy robototekhnichnykh system: navchalnyi posibnyk [Mathematical foundations of robotic systems: Textbook]*. Kharkiv: National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», 224 p. <https://library.khai.edu/> [in Ukrainian].
11. Semenenko, Yu. O., Sysoiev, Yu. O., Semenenko, O. D., Stepanenko, D. R., Soroka, A. S., & Shyrokyi, Yu. V. (2026). Enerhoefektyvni alhorytmy obrobky sensornoi informatsii dlia nazemnykh robotyzovanykh system riznoho pryznachennia [Energy-efficient algorithms for processing sensor information for ground robotic systems of various purposes]. *Information and Control Systems for Railway Transport*, 31(2), 53–68. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i2.362229> [in Ukrainian].
12. Petko, M., Karpel, G., Gac, K., Góra, G., Kobus, K., & Ochoński, J. (2016). Trajectory tracking controller of the hybrid robot for milling. *Mechatronics*, 37, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.012> [in English].
13. Semenenko, Yu. O., & Semenenko, O. D. (2025). Analiz mozhylyvosti keruvannia delta-robotom za dopomohoiu PID-rehuliatora [Analysis of the possibility of controlling a delta robot using a PID controller]. *Proceedings of the 38th International Scientific and Practical Conference «Information and Control Systems for Railway Transport»*, 2–3. Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/dodatok_do_zhurnalu_ikszt_-_3_2025.pdf [in Ukrainian].
14. Zahedi, A., Shafei, A., & Shamsi, M. (2023). Application of hybrid robotic systems in crop harvesting: Kinematic and dynamic analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107724> [in English].
15. Droukas, L., Doulgeri, Z., Tsakiridis, N. L., Triantafyllou, D., Kleitsiotis, I., Mariolis, I., Giakoumis, D., Tzovaras, D., Kateris, D., & Bochtis, D. (2023). A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01793-z> [in English].
16. Staicu, S. (2018). Kinematics and dynamics of a hybrid parallel manipulator. In *Dynamics of Parallel Robots*, 309–326. Cham: Springer.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-99522-9_12 [in English].

17. Modak, S., & Rama Krishna, K. (2024). Kinematics and singularity analysis of a novel hybrid industrial manipulator. *Robotica*, 42, 579–610. <https://doi.org/10.1017/S0263574723001662> [in English].

18. Zhang, J., Zhao, Y. Q., & Jin, Y. (2016). Elastodynamic modeling and analysis for an Exechon parallel kinematic machine. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(3), 031011. <https://doi.org/10.1115/1.4030938> [in English].

19. Jin, Y., Bi, Z. M., Liu, H. T., Higgins, C., Price, M., Chen, W. H., & Huang, T. (2015). Kinematic analysis and dimensional synthesis of Exechon parallel kinematic machine for large volume machining. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), 041004. <https://doi.org/10.1115/1.4029499> [in English].

Investigation of Kinematic Characteristics of Hybrid Parallel-Serial Robotic Systems with an Additional Kinematic Linkage

The article investigates the kinematic characteristics of hybrid parallel-serial robotic systems with an additional kinematic linkage. The relevance of the study is driven by the growing demand in modern manufacturing for high-performance robotic systems capable of ensuring high positioning accuracy, structural rigidity, and enhanced functionality when performing technological operations in aviation, mechanical engineering, automotive industry, and other sectors. Parallel manipulators are characterized by high load-carrying capacity, speed, and positioning accuracy of the end-effector. However, they have a limited workspace. One of the promising ways to overcome this limitation is the use of hybrid structures that combine the advantages of parallel and serial mechanisms. Such systems allow expanding the working area while maintaining high stiffness and dynamic performance.

This paper examines a hybrid parallel-serial manipulator, a distinctive design feature of which is the presence of an additional passive kinematic linkage. The use of the additional link reduces bending loads on the linear actuators and increases the overall structural rigidity during the manipulation of heavy objects. Furthermore, the additional kinematic linkage expands the technological capabilities of the system and can be used to implement auxiliary functions, such as supplying working media, energy, or mounting additional functional modules. Within the framework of the study, the structural analysis of the manipulator was performed and a mathematical model for determining its kinematic characteristics was developed. The features of solving the forward and inverse kinematics problems were considered, and the relationships between the actuator parameters and the position of the end-effector were established. The obtained results can be applied in the design and synthesis of control systems for hybrid robotic

complexes with increased requirements for accuracy and rigidity.

Keywords: hybrid manipulator, parallel-serial structure, robotic system, kinematic analysis, forward kinematics, inverse kinematics, additional kinematic linkage.

Відомості про авторів:

Семененко Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua. ORCID: [0000-0001-9422-3528](https://orcid.org/0000-0001-9422-3528).

Семененко Ольга Діонісівна – асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». E-mail: o.semenenko@khai.edu. ORCID: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Рябенков Ігор Олександрович – кандидат технічних наук, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. ORCID: [0009-0006-5375-5089](https://orcid.org/0009-0006-5375-5089).

Сорока Анастасія Сергіївна – студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. E-mail: a.soroka@student.khai.edu. ORCID: [0009-0005-3166-4621](https://orcid.org/0009-0005-3166-4621).

Широкий Юрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu. ORCID: [0000-0002-4713-0334](https://orcid.org/0000-0002-4713-0334).

About the Author:

Semenenko Yurii Oleksandrovych - Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua. ORCID iD: [0000-0001-9422-3528](https://orcid.org/0000-0001-9422-3528).

Semenenko Olha Dionisiivna – Assistant of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science

and Robotic Mechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». E-mail: o.semenenko@khai.edu. ORCID iD: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Riabnikov Ihor Oleksandrovych – Doctor of Philosophy, Assistant of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Mechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0009-0006-5375-5089.

Soroka Anastasiya Serhiivna – Student of the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic Mechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: a.soroka@student.khai.edu. ORCID: 0009-0005-3166-4621.

Shyrokyi Yurii Vyacheslavovich – Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu. ORCID: 0000-0002-4713-0334.

Стаття надійшла 27.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 22.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширена на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

PANCHENKO Serhii Volodymyrovych¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

ZHUCHENKO Oleksandr Serhiiovych¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

LYSECHKO Volodymyr Petrovych², Doctor of Technical Sciences, Professor

INDYK Serhii Volodymyrovych¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

1 Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

2 Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Estimation of the Energy of Interfering Signals in a Code Division Multiple Access System Based on Unequal-Energy Complex Signals for Users Susceptible to Dominance by Other Users' Signals

In a code-division multiple access system, when a user's signal is received, the signals from the other users are treated as interfering signals and produce multiple-access interference. For unequal-energy complex signal ensembles, a nonuniform signal-energy distribution causes the total energy of interfering signals to differ among users and gives rise to the signal-dominance effect. This study aims to obtain an estimate of the energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users, to be used as a pessimistic estimate for the ensemble as a whole. To reduce the set of individual values to a single estimate, the unequal-energy complex signal ensemble is equivalently transformed into a hypothetical equal-energy complex signal ensemble while preserving the total signal energy. It is shown that the normalized total energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users is approximately equal to the structural equivalent size, which therefore provides a pessimistic estimate for the unequal-energy complex signal ensemble as a whole. For equal-energy complex signal ensembles, the structural equivalent size is equal to the actual ensemble size, corresponding to a uniform signal-energy distribution. As the degree of nonuniformity in the signal-energy distribution increases, the structural equivalent size increases monotonically toward an upper bound corresponding to concentration of the total ensemble energy in a single signal—the highest possible nonuniformity for a fixed total signal energy. Thus, the structural equivalent size of an unequal-energy complex signal ensemble represents the calculated number of equal-energy complex signals in an ensemble with the same total signal energy as the original ensemble. It increases with the degree of signal-energy nonuniformity, provides a pessimistic estimate of the normalized total energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users, and allows performance metrics developed for equal-energy complex signal ensembles to be extended to unequal-energy complex signal ensembles by substituting the structural equivalent size into the corresponding expressions for equal-energy complex signal ensembles.

Keywords: code-division multiple access system, multiple-access interference, energy of interfering signals, unequal-energy complex signal ensemble, structural equivalent size, dominance by other users' signals, cross-correlation.

Introduction.

In a code-division multiple access system, when a user's signal is received, the signals from the other users are treated as interfering signals. These interfering signals produce multiple-access interference (MAI), whose energy depends on the energies of the interfering signals and their cross-correlations. Computing cross-correlations for every pair of signals in the ensemble can be computationally demanding, so a common approximation is to replace the pairwise cross-correlations with the maximum cross-correlation value in the ensemble, which is assumed to be known in this study. Under this approximation, the multiple-access interference energy is

the product of the total energy of the interfering signals, obtained by summing the energies of all ensemble signals except the user's desired signal, and the square of the maximum cross-correlation value. For equal-energy complex signals, removing any desired signal from the ensemble leaves the same sum of signal energies, so the total energy of the interfering signals is the same for every user.

For an unequal-energy complex signal ensemble, removing signals with different energies produces different remaining energy sums; therefore, the total energy of interfering signals differs among users because of the nonuniform signal-energy distribution.

Direct calculation of the interfering-signal energy for each user yields a set of individual values. For performance evaluation, it is useful to have a single numerical estimate that reduces this set to one quantity while accounting for the nonuniform signal-energy distribution. This allows a relation similar to that for the equal-energy case, in which the multiple-access interference energy is calculated as the product of this estimate and the square of the maximum cross-correlation value.

A nonuniform energy distribution in an unequal-energy signal ensemble gives rise to the signal-dominance effect, which appears as an increase in the total multiple-access interference energy relative to the desired-signal energy of a user. Under the adopted approximation, in which the signal cross-correlations are replaced by a single ensemble-wide maximum value, the subsequent analysis can be based on the total energies of the interfering signals.

If a user's desired signal has lower energy than the signals of at least some other users, the multiple-access interference energy relative to that desired signal increases, making the user susceptible to signal dominance from other users. Conversely, if a user's signal has higher energy than the signals of at least some other users, it contributes more strongly to the total interfering-signal energy seen by those users, so the signal tends to dominate the signals of other users. These two manifestations of signal dominance correspond to two numerical estimates of the energy of interfering signals: an estimate for users susceptible to signal dominance from other users, used as a pessimistic estimate for the ensemble as a whole, and an estimate for signals that tend to dominate the signals of other users, used as an optimistic estimate for the ensemble as a whole.

The energy of interfering signals is therefore the basis for calculating multiple-access interference energy, with the maximum cross-correlation value for the ensemble treated as known. Hence, the energy of interfering signals must be estimated before the corresponding performance metrics are evaluated.

The basic principles of code-division multiple access relate intrasystem interference to user signal energies and ensemble cross-correlations [1 – 4]. Ensembles of pulse sequences with low signal interaction are used in pulse-based multiple-access systems [5, 6]. Such ensembles are treated as complex time-division signals with a periodic structure [6, 7]. Complex time-division signals with a periodic structure can be synthesized using either a correction-and-search method or an analytical method [7]. Different numbers of pulses at a fixed pulse duration produce an inherent unequal-energy structure [8]. For unequal-energy complex signal ensembles, the total multiple-access interference energy depends on both signal cross-correlations and the nonuniformity of the signal-energy distribution [9].

An equivalent transformation replaces an unequal-energy complex signal ensemble with a hypothetical equal-energy complex signal ensemble while preserving the total signal energy. The size of the

hypothetical ensemble is the calculated number of equal-energy signals and is numerically equal to an approximate estimate of the normalized total energy of interfering signals [10, 11]. This provides a common basis for two estimates of the energy of interfering signals: a pessimistic estimate for users susceptible to signal dominance from other users and an optimistic estimate for signals that tend to dominate the signals of other users.

The aim of this study is to obtain an estimate of the energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users, to be used as a pessimistic estimate for the ensemble as a whole.

Materials and methods.

For an equal-energy complex signal ensemble of size L , in which each signal has energy E , the total energy of interfering signals for the i -th user is obtained by summing the energies $E_j = E$ of the other $L - 1$ users, with $j = 1, \dots, L$ and $j \neq i$:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^L E_j = \sum_{j=1}^{L-1} E = (L - 1)E.$$

After normalization by the signal energy E , this gives a value one less than the ensemble size. For $L \gg 1$, the approximation $L - 1 \approx L$ is acceptable:

$$\frac{\sum_{j=1}^{L-1} E}{E} = \frac{(L - 1)E}{E} = L - 1 \approx L.$$

Thus, $L - 1$ is the normalized total energy of interfering signals, while the ensemble size L provides its approximate estimate.

For an unequal-energy complex signal ensemble, the nonuniform signal energies cause the total energy of interfering signals to differ among users [8, 9].

To evaluate users susceptible to signal dominance from other users, consider the case in which the energy of the i -th user's signal is lower than the energy of the k -th user's signal.

Let E_i be the desired-signal energy of the i -th user, $i = 1, \dots, L$, and let E_k denote the signal energies of users $k = 1, \dots, L$, $k \neq i$, for which $E_i < E_k$. The total energies of the interfering signals for the i -th and k -th users are then given by, respectively:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^L E_j = \sum_{j=1}^L E_j - E_i,$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^L E_j = \sum_{j=1}^L E_j - E_k.$$

The difference between the total energies of the interfering signals for the i -th and k -th users is:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^L E_j - \sum_{j=1, j \neq k}^L E_j = \left(\sum_{j=1}^L E_j - E_i \right) - \left(\sum_{j=1}^L E_j - E_k \right) = E_k - E_i > 0.$$

Therefore, the total energy of interfering signals for the i -th user is greater than that for the k -th user:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^L E_j > \sum_{j=1, j \neq k}^L E_j.$$

This relation characterizes the susceptibility of the i -th user to signal dominance from users k for which $E_i < E_k$.

To obtain a single numerical estimate of the energy of interfering signals, [10, 11] use a mathematical framework in which the nonuniformity of a finite set of nonnegative quantities is characterized through relationships among their sum, sum of squares, mean, and variance [12, 13], as well as through concentration measures [14 – 18]. The basic relation underlying the equivalent transformation is the Cauchy–Schwarz inequality [13], which, for a fixed total ensemble signal energy and a fixed ensemble size, relates the square of the total signal energy to the sum of squared signal energies. Dividing both sides of the Cauchy–Schwarz inequality by the square of the ensemble size converts the left-hand side into the square of the mean signal energy and the right-hand side into the mean squared signal energy; the difference between them is the signal-energy variance. Equality therefore corresponds to zero variance and thus to an ensemble of equal-energy signals, whereas strict inequality corresponds to a nonuniform signal-energy distribution and thus to an ensemble of unequal-energy signals. Normalizing the signal energies by the total ensemble signal energy produces dimensionless energy fractions, which is equivalent to dividing both sides of the Cauchy–Schwarz inequality by the square of the sum of signal energies.

If both sides of the resulting Cauchy–Schwarz inequality are additionally divided by the ensemble size, the left-hand side becomes the reciprocal of the ensemble size, while the right-hand side becomes the sum of squared signal-energy fractions. This sum is a concentration measure for a finite set of nonnegative quantities [14 – 18] and, for an equal-energy ensemble, is equal to the left-hand side of the inequality.

Normalizing the concentration measure by its value for an equal-energy ensemble gives a relative quantity equal to one for equal signal energies and greater than one for a nonuniform signal-energy distribution. A reciprocal quantity also exists, and the product of the concentration measure and its reciprocal is equal to one [15, 16]. Normalizing this reciprocal quantity by its equal-energy value gives a relative quantity equal to one for equal signal energies and less than one for a nonuniform signal-energy distribution. The resulting normalized

quantities are used as factors applied to the ensemble size [10, 11].

This paper uses the normalized concentration measure of signal energies. It equals one for an equal-energy ensemble and exceeds one when the signal-energy distribution is nonuniform, corresponding to an increased estimate of the energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users:

$$\kappa_E = \frac{\sum_{i=1}^L E_i^2}{(\sum_{i=1}^L E_i)^2},$$

$$\frac{\kappa_E}{1/L} = L\kappa_E = \frac{L \sum_{i=1}^L E_i^2}{(\sum_{i=1}^L E_i)^2} = 1 + C_v^2,$$

where κ_E is the concentration measure of signal energies;

C_v^2 is the squared coefficient of variation of signal energy.

The squared coefficient of variation of signal energy is defined in terms of the mean ensemble signal energy and the signal-energy variance:

$$C_v^2 = \frac{\sigma_E^2}{\mu_E^2}, \quad \mu_E = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L E_i, \quad \sigma_E^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L E_i^2 - \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L E_i \right)^2,$$

where μ_E is the mean ensemble signal energy; σ_E^2 is the variance of the ensemble signal energies.

For an equal-energy complex signal ensemble, with $C_v^2 = 0$, the quantity $\kappa_E/(1/L)$ is equal to one. For a nonuniform energy distribution, with $C_v^2 > 0$, it exceeds one and increases with the degree of signal-energy nonuniformity. We therefore use this quantity as a factor applied to the ensemble size L to obtain the size $L_{eq}^{(+)}$ of an equivalent equal-energy complex signal ensemble, defined as the product of $\kappa_E/(1/L)$ and L :

$$L_{eq}^{(+)} = L \frac{\kappa_E}{1/L} = L(L\kappa_E) = L(1 + C_v^2) = L \frac{\sum_{i=1}^L E_i^2}{(\sum_{i=1}^L E_i)^2/L} = \frac{L^2 \sum_{i=1}^L E_i^2}{(\sum_{i=1}^L E_i)^2}.$$

The size $L_{eq}^{(+)}$ of the equivalent equal-energy complex signal ensemble is defined as the structural equivalent size of the unequal-energy complex signal ensemble. It represents the hypothetical calculated number of equal-energy complex signals in an ensemble having the same total signal energy as the original unequal-energy complex signal ensemble.

Under the approximation $L_{eq}^{(+)} - 1 \approx L_{eq}^{(+)}$, the structural equivalent size $L_{eq}^{(+)}$ is numerically equal to an approximate estimate of the normalized total energy of

interfering signals in the hypothetical equal-energy complex signal ensemble. Without this approximation, the normalized total energy of interfering signals is $\frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - 1}{L}$.

The bounds on the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ follow from the bounds on the normalized concentration measure $\kappa_E/(1/L)$:

$$1 \leq \frac{\kappa_E}{1/L} \leq L.$$

Multiplying $\kappa_E/(1/L)$ by the ensemble size L gives the following bounds on the structural equivalent size:

$$L \leq L_{\text{eq}}^{(+)} \leq L^2.$$

Thus, the lower bound $L_{\text{eq}}^{(+)} = L$ corresponds to an equal-energy complex signal ensemble in which each i -th signal has energy E , so that $E_i = E$, $i = 1, \dots, L$. The upper bound $L_{\text{eq}}^{(+)} = L^2$ corresponds to concentration of the entire ensemble energy in a single i -th signal, $E_i = E_{\Sigma} = \sum_{r=1}^L E_r$, while all other signal energies are zero, $E_j = 0$, $j = 1, \dots, L$, $j \neq i$.

The analytical relationship between the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2 and the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ for an ensemble of size L is:

$$\frac{L_{\text{eq}}^{(+)}}{L} = 1 + C_v^2,$$

which gives the following expression for C_v^2 :

$$C_v^2 = \frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - L}{L} = \frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - L}{L}.$$

This relation establishes a one-to-one correspondence between the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2 and the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ for an ensemble of size L . A larger C_v^2 corresponds to a larger $L_{\text{eq}}^{(+)}$. When $C_v^2 = 0$, $L_{\text{eq}}^{(+)} = L$, so the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ equals the size L of the equal-energy complex signal ensemble.

The bounds on C_v^2 can therefore be obtained from the bounds on the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$:

$$L \leq L_{\text{eq}}^{(+)} \leq L^2.$$

For $L_{\text{eq}}^{(+)} = L$, we obtain:

$$C_v^2 = \frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - L}{L} = \frac{L - L}{L} = 0.$$

For $L_{\text{eq}}^{(+)} = L^2$:

$$C_v^2 = \frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - L}{L} = \frac{L^2 - L}{L} = L - 1.$$

For an ensemble of size L , the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2 therefore satisfies:

$$0 \leq C_v^2 \leq L - 1,$$

where $C_v^2 = 0$ is the lower bound corresponding to an equal-energy complex signal ensemble, for which the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ equals the original ensemble size L ;

$C_v^2 = L - 1$ is the upper bound corresponding to concentration of the total ensemble signal energy in one signal, for which the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ equals L^2 .

Assuming that $L_{\text{eq}}^{(+)}$ is treated as an integer, the energy $E_{\text{eq}}^{(+)}$ of one signal in the hypothetical equal-energy complex signal ensemble is determined by preserving the total signal energy of the original unequal-energy ensemble:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L E_i = \sum_{q=1}^{L_{\text{eq}}^{(+)}} E_{\text{eq}}^{(+)}.$$

Because all signals in the equivalent ensemble have the same energy, the total signal energy of the equivalent ensemble can be written as:

$$E_{\Sigma} = \sum_{q=1}^{L_{\text{eq}}^{(+)}} E_{\text{eq}}^{(+)} = L_{\text{eq}}^{(+)} E_{\text{eq}}^{(+)}.$$

Hence, the energy $E_{\text{eq}}^{(+)}$ of one signal in the equivalent equal-energy complex signal ensemble is:

$$E_{\text{eq}}^{(+)} = \frac{E_{\Sigma}}{L_{\text{eq}}^{(+)}}.$$

This relation preserves the total signal energy in the equivalent equal-energy complex signal ensemble. The structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ and the single-signal energy $E_{\text{eq}}^{(+)}$ jointly specify the replacement of the original unequal-energy complex signal ensemble by a

hypothetical equal-energy complex signal ensemble while preserving the total signal energy.

To determine the change in total multiple-access interference energy under the equivalent transformation, consider the total multiple-access interference energy of the original ensemble of complex time-division signals with a periodic structure [5 – 8] and that of the equivalent equal-energy signal ensemble specified by the structural equivalent size $L_{eq}^{(+)}$.

Using the full set of ensemble cross-correlations, define the relative difference in total multiple-access interference energy under the equivalent transformation, $\Delta_{I,\Sigma}^{(+)}$, as:

$$\Delta_{I,\Sigma}^{(+)} = \frac{E_{I,\Sigma}^{(eq,+)} - E_{I,\Sigma}}{E_{I,\Sigma}},$$

where $E_{I,\Sigma}$ is the total multiple-access interference energy of the original ensemble;

$E_{I,\Sigma}^{(eq,+)}$ is the total multiple-access interference energy of the equivalent equal-energy complex signal ensemble specified by the structural equivalent size $L_{eq}^{(+)}$.

Define the total multiple-access interference energy $E_{I,\Sigma}$ of the original ensemble of complex time-division signals with a periodic structure as the sum of the individual multiple-access interference energies $E_{I,i}$ for all users i . For this ensemble, the number of pulse overlaps for each pair of the i -th and j -th signals, $[i \neq j]$, is limited to one for any relative time shift [5 – 8]:

$$(R_{ij}^{(max)})^2 = \frac{1}{E_i E_j},$$

$$E_{I,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^L E_j (R_{ij}^{(max)})^2,$$

$$E_{I,\Sigma} = \sum_{i=1}^L E_{I,i} = \sum_{i=1}^L \frac{L-1}{E_i} = (L-1) \sum_{i=1}^L \frac{1}{E_i}.$$

Define the total multiple-access interference energy $E_{I,\Sigma}^{(eq,+)}$ of the equivalent equal-energy complex signal ensemble as the sum of the individual multiple-access interference energies $E_{I,i}^{(eq,+)}$ for all hypothetical users. All signals in the equivalent ensemble have energy $E_{eq}^{(+)}$, so the sum of identical terms reduces to the number of terms multiplied by one term:

$$(R_{ij}^{(max)})^2 = (R^{(max)})^2 = \frac{1}{E_{eq}^{(+)} E_{eq}^{(+)}}$$

$$E_{I,i}^{(eq,+)} = \sum_{j=1, j \neq i}^{L_{eq}^{(+)}} E_{eq}^{(+)} (R_{ij}^{(max)})^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^{L_{eq}^{(+)}} E_{eq}^{(+)} \frac{1}{(E_{eq}^{(+)})^2} = (L_{eq}^{(+)} - 1) \frac{1}{E_{eq}^{(+)}}$$

$$E_{I,\Sigma}^{(eq,+)} = \sum_{i=1}^{L_{eq}^{(+)}} E_{I,i}^{(eq,+)} = L_{eq}^{(+)} E_{I,i}^{(eq,+)} = L_{eq}^{(+)} \frac{L_{eq}^{(+)} - 1}{E_{eq}^{(+)}} = \frac{L_{eq}^{(+)} (L_{eq}^{(+)} - 1)}{E_{eq}^{(+)}} = \frac{(L_{eq}^{(+)})^2 (L_{eq}^{(+)} - 1)}{E_{eq}^{(+)}}$$

For the hypothetical equal-energy complex signal ensemble equivalent to the original ensemble of complex time-division signals with a periodic structure, use the relation $(R_{ij}^{(max)})^2 = (R^{(max)})^2 = 1/(E_{eq}^{(+)} E_{eq}^{(+)})$. This relation preserves the property of the ensemble of complex time-division signals with a periodic structure: if at most one pulse overlap occurs for a pair of signals in the hypothetical equivalent ensemble, their squared maximum cross-correlation is the reciprocal of the product of the energies of that pair. In the hypothetical equivalent equal-energy complex signal ensemble, every signal has energy $E_{eq}^{(+)}$; therefore, every signal pair has the same energy product, and the squared maximum cross-correlation has the same value for all signal pairs, $(R^{(max)})^2 = 1/(E_{eq}^{(+)} E_{eq}^{(+)})$.

Using the full set of cross-correlations for the ensemble of complex time-division signals with a periodic structure, define the relative difference in individual multiple-access interference energy under the equivalent transformation, $\Delta_{I,i}^{(+)}$, as:

$$\Delta_{I,i}^{(+)} = \frac{E_{I,thr}^{(+)} - E_{I,i}}{E_{I,i}}$$

$$E_{I,thr}^{(+)} = E_{I,i}^{(eq,+)} = \frac{L_{eq}^{(+)} - 1}{E_{eq}^{(+)}}$$

$$\Delta_{I,i}^{(+)} = \frac{L_{eq}^{(+)} - 1}{E_{eq}^{(+)} E_{I,i}} - 1,$$

where $E_{I,i}$ is the individual multiple-access interference energy for the i -th user, corresponding to the i -th signal of the original ensemble of complex time-division signals with a periodic structure;

$E_{I,thr}^{(+)}$ is the individual multiple-access interference energy of a hypothetical user in the equivalent equal-energy complex signal ensemble; in this comparison it is used as the threshold at which the sign of the relative difference $\Delta_{I,i}^{(+)}$ changes.

The relative difference $\Delta_{I,i}^{(+)}$ is positive when $E_{I,i}$ is less than $E_{I,thr}^{(+)}$ and negative when $E_{I,i}$ is greater than $E_{I,thr}^{(+)}$.

$$E_{I,i} > E_{I,thr}^{(+)}, \Delta_{I,i}^{(+)} < 0,$$

$$E_{I,i} < E_{I,thr}^{(+)}, \Delta_{I,i}^{(+)} > 0,$$

$$E_{I,i} = E_{I,thr}^{(+)}, \Delta_{I,i}^{(+)} = 0.$$

The total energy of interfering signals for the i -th user is the sum of the signal energies of the other users:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^L E_j.$$

This sum is used to calculate the individual multiple-access interference energy:

$$E_{I,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^L E_j (R_{ij}^{(max)})^2.$$

For complex time-division signals with a periodic structure, the number of pulse overlaps for each signal pair is limited to one for any relative time shift; therefore:

$$(R_{ij}^{(max)})^2 = \frac{1}{E_i E_j},$$

$$E_{I,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^L E_j \frac{1}{E_i E_j} = \sum_{j=1, j \neq i}^L \frac{1}{E_i} = \frac{L-1}{E_i}.$$

The resulting expressions for the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$ and the relative difference in individual multiple-access interference energy under the equivalent transformation, $\Delta_{I,i}^{(+)}$, make it possible to determine the effect of signal-energy nonuniformity represented by the squared coefficient of variation C_v^2 . To express $E_{I,thr}^{(+)}$ in terms of C_v^2 , use:

$$L_{eq}^{(+)} = L(1 + C_v^2), E_{\Sigma} = L\mu_E.$$

Substitution into the expression for $E_{I,thr}^{(+)}$ gives:

$$E_{I,thr}^{(+)} = \frac{L_{eq}^{(+)}(L_{eq}^{(+)} - 1)}{E_{\Sigma}} = \frac{L(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{L\mu_E} = \frac{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{\mu_E}.$$

Consider the components of the resulting expression for the threshold level $E_{I,thr}^{(+)}$:

1) the factor $1 + C_v^2$ depends linearly on C_v^2 and has the initial value 1 at $C_v^2 = 0$;

2) the factor $L(1 + C_v^2) - 1$ depends linearly on C_v^2 and has the initial value $L - 1$ at $C_v^2 = 0$;

3) the product $(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)$ depends quadratically on C_v^2 and is equal to $L - 1$ at $C_v^2 = 0$;

4) at $C_v^2 = 0$, the ratio of the product $(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)$ to μ_E is $(L - 1)/\mu_E$.

For fixed L and μ_E , $E_{I,thr}^{(+)}$ depends quadratically on C_v^2 and increases as C_v^2 increases.

Results and discussion. Fig. 1 shows the individual multiple-access interference energy for an ensemble of complex time-division signals with a periodic structure and the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$ as functions of the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2 . Each point corresponds to a separate ensemble obtained by successively removing the highest-energy signals from an ensemble of size $L = 76$ with the set $\{2, \dots, 167, 173, 179, \dots, 379, 383\}$, followed by ordering the resulting ensembles by increasing C_v^2 . The individual multiple-access interference energy of the original ensemble is calculated as $E_{I,i} = (L - 1)/E_i$.

For the signal with energy 173, the individual multiple-access interference energy curve is initially above the threshold curve, then crosses it and remains below it over the rest of the shown range. For the signal with energy 383, the individual multiple-access interference energy curve remains below the threshold curve throughout the shown range.

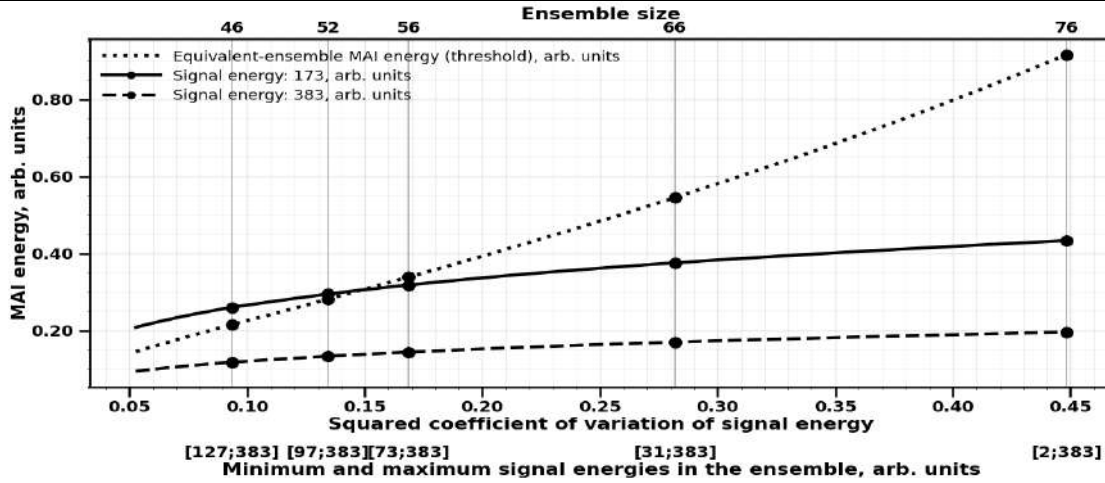


Fig. 1. Individual multiple-access interference energy of the original ensemble $E_{I,i}$ and threshold $E_{I,thr}^{(+)}$ versus the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2

In Fig. 1, the threshold curve at each value of the squared coefficient of variation C_v^2 is obtained from the structural equivalent transformation, which reflects an increase in the hypothetical calculated number of equal-energy signals relative to the size of the original unequal-energy signal ensemble. For complex time-division signals with a periodic structure, the individual multiple-access interference energy is $E_{I,i} = (L - 1)/E_i$; therefore, lower desired-signal energies correspond to higher individual multiple-access interference energies. Within the structural equivalent transformation, a user is considered susceptible to signal dominance from other users when $E_{I,i} > E_{I,thr}^{(+)}$. For the signal with energy 173, the individual multiple-access interference energy exceeds the threshold only over the part of the shown range preceding the intersection of the curves. Over this part of the ensemble sequence, the user with signal energy 173 can be considered susceptible to signal dominance from other users.

The results for signal energies 173 and 383 show different relative positions of the individual multiple-access interference energy curve $E_{I,i}$ and the threshold curve $E_{I,thr}^{(+)}$. For the signal with energy 173, the two curves change their relative positions by crossing, whereas for the signal with energy 383 the individual multiple-access interference energy remains below the threshold throughout the shown range.

Next, determine the bounds of the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$ and then the user signal energy E_i for which the individual multiple-access interference energy equals $E_{I,thr}^{(+)}$.

Determine $E_{I,thr}^{(+)}$ as the squared coefficient of variation changes from $C_v^2 = 0$ to $C_v^2 = L - 1$ for fixed total ensemble energy E_Σ and fixed ensemble size L . The value $C_v^2 = 0$ corresponds to an equal-energy complex

signal ensemble, whereas $C_v^2 = L - 1$ corresponds to concentration of the total ensemble energy in a single signal. The mean signal energy $\mu_E = E_\Sigma/L$ remains constant, while changing C_v^2 redistributes the energy among the ensemble signals.

For $C_v^2 = 0$:

$$E_{I,thr}^{(+)} = \frac{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{\mu_E} = \frac{L - 1}{\mu_E},$$

$$E_i = \mu_E,$$

$$E_{I,i} = \frac{L - 1}{E_i} = \frac{L - 1}{\mu_E} = E_{I,thr}^{(+)}$$

For $C_v^2 = L - 1$:

$$E_{I,thr}^{(+)} = \frac{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{\mu_E} = \frac{L(L^2 - 1)}{\mu_E}.$$

The threshold is bounded by:

$$\frac{L - 1}{\mu_E} \leq E_{I,thr}^{(+)} \leq \frac{L(L^2 - 1)}{\mu_E},$$

for

$$0 \leq C_v^2 \leq L - 1, E_\Sigma = \text{const}, L = \text{const}, \mu_E = \frac{E_\Sigma}{L} = \text{const}.$$

Now determine the user signal energy E_i for which the individual multiple-access interference energy equals the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$:

$$E_{I,i} = \frac{L - 1}{E_i}$$

$$E_{I,\text{thr}}^{(+)} = \frac{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{\mu_E},$$

$$\frac{L-1}{E_i} = \frac{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}{\mu_E},$$

which gives the user signal energy:

$$E_i = \mu_E \frac{L-1}{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}.$$

The ratio of the user signal energy E_i to the mean ensemble signal energy μ_E is:

$$\frac{E_i}{\mu_E} = \frac{L-1}{(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1)}.$$

For $C_v^2 = 0$:

$$\frac{E_i}{\mu_E} = 1,$$

$$E_i = \mu_E.$$

For $0 < C_v^2 < L-1$, the denominator satisfies

$$(1 + C_v^2)(L(1 + C_v^2) - 1) > L-1,$$

therefore:

$$\frac{E_i}{\mu_E} < 1,$$

$$E_i < \mu_E.$$

Thus, as C_v^2 increases, the threshold $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$ corresponds to signal energies below the mean ensemble signal energy μ_E .

Accordingly, intermediate values of $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$ correspond to the part of the original unequal-energy complex signal ensemble whose signal energies are below the mean signal energy μ_E of the original ensemble.

The threshold $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$ can also be related to the arithmetic mean of the individual multiple-access interference energies by:

$$E_{I,\text{thr}}^{(+)} \geq \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L E_{I,i},$$

where strict inequality applies to an unequal-energy complex signal ensemble, while equality holds only for an equal-energy complex signal ensemble.

Therefore, for an unequal-energy complex signal ensemble, the threshold $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$ is greater than the arithmetic mean of the individual multiple-access interference energies of the original ensemble:

$$E_{I,\text{thr}}^{(+)} > \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L E_{I,i}.$$

To quantify the deviation of the individual multiple-access interference energies $E_{I,i}$ of the original unequal-energy complex signal ensemble from the threshold $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$, use the absolute relative difference $|\Delta_{I,i}^{(+)}|$:

$$|\Delta_{I,i}^{(+)}| = \left| \frac{E_{I,\text{thr}}^{(+)} - E_{I,i}}{E_{I,i}} \right| = \left| \frac{L_{\text{eq}}^{(+)} - 1}{E_{\text{eq}}^{(+)} E_{I,i}} - 1 \right|,$$

This quantity measures the relative magnitude of the deviation of $E_{I,i}$ from $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$ regardless of its direction, allowing the deviations for different users to be compared.

Fig. 2 shows $|\Delta_{I,i}^{(+)}|$ versus C_v^2 under conditions analogous to those in Figure 1. For the signal with energy 173, the curve has a decreasing segment, a minimum region, and an increasing segment. This behavior is consistent with Fig. 1, where the individual multiple-access interference energy curve $E_{I,i}$ for the signal with energy 173 crosses the threshold curve $E_{I,\text{thr}}^{(+)}$. The smallest values of $|\Delta_{I,i}^{(+)}|$ correspond to the region in Figure 1 where the two curves intersect or come closest to each other.

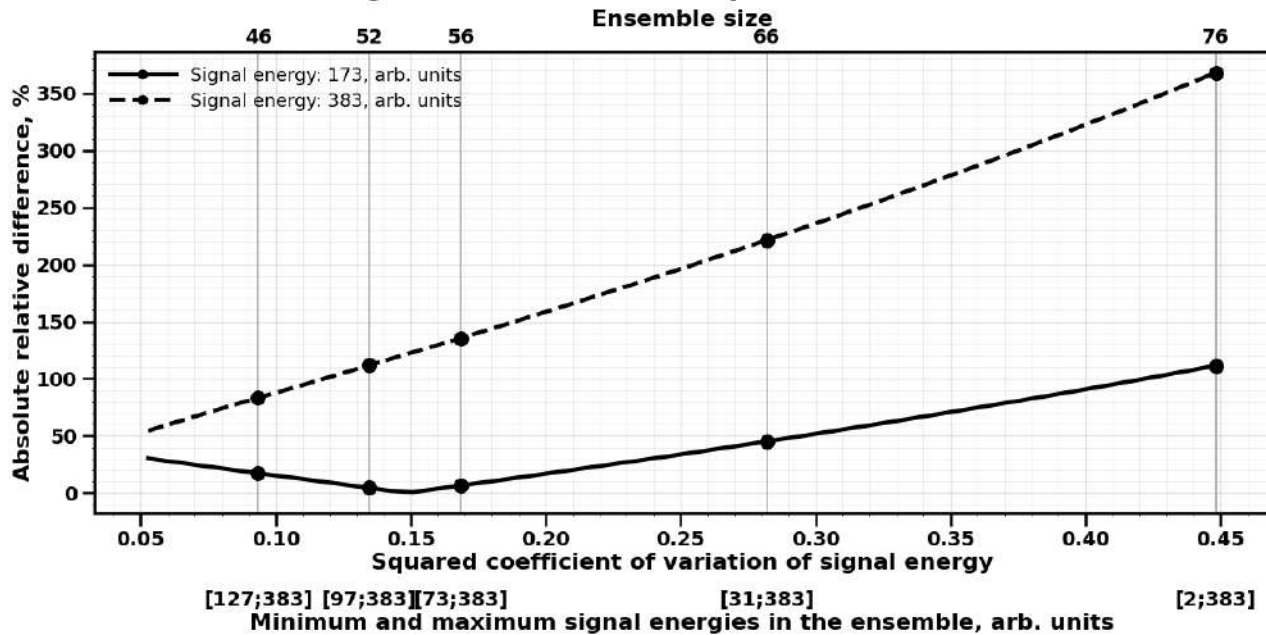


Fig. 2. Absolute relative difference between the individual multiple-access interference energy and the threshold $\Delta_{I,i}^{(+)}$ versus the squared coefficient of variation of signal energy C_v^2

For the signal with energy 383, the curve in Fig. 2 has no minimum region. This is consistent with Fig. 1, where the individual multiple-access interference energy $E_{I,i}$ for the signal with energy 383 remains below the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$ throughout the shown range, so no minimum region appears on the curve.

Fig. 1 and 2 show two different aspects of the deviation of the individual multiple-access interference energy $E_{I,i}$ from the threshold $E_{I,thr}^{(+)}$. Fig. 1 indicates the sign of the relative difference through the relative positions of the $E_{I,i}$ and $E_{I,thr}^{(+)}$ curves. Fig. 2 shows the relative magnitude of the deviation through the absolute relative difference $|\Delta_{I,i}^{(+)}|$.

Conclusions.

It is shown that the normalized total energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users is approximately equal to the structural equivalent size and therefore provides a pessimistic estimate for the unequal-energy complex signal ensemble as a whole. For equal-energy complex signal ensembles, the structural equivalent size equals the original ensemble size, corresponding to a uniform signal-energy distribution. As the degree of signal-energy nonuniformity increases, the structural equivalent size increases monotonically toward an upper bound corresponding to concentration of the entire ensemble energy in a single signal, i.e., the highest possible nonuniformity for a fixed total signal energy. Thus, the structural equivalent size of an unequal-energy complex signal ensemble represents the calculated number of equal-energy complex signals in an ensemble with the same total signal energy as the original ensemble,

increases with the degree of signal-energy nonuniformity, provides a pessimistic estimate of the normalized total energy of interfering signals for users susceptible to signal dominance from other users, and allows performance metrics developed for equal-energy complex signal ensembles to be extended to unequal-energy complex signal ensembles by substituting the structural equivalent size into the corresponding expressions for equal-energy complex signal ensembles.

References

1. Sklar, B. (2001). Digital communications: Fundamentals and applications (2nd ed.). Prentice Hall PTR. <https://www.informit.com/store/digital-communications-fundamentals-and-applications-9780130847881>
2. Ipatov, V. P. (2005). Spread spectrum and CDMA: Principles and applications. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470091800>
3. Viterbi, A. J. (1995). CDMA: Principles of spread spectrum communication. Addison-Wesley. <https://www.ece.ucsd.edu/faculty-research/books-by-faculty/cdma-principles-of-spread-spectrum-communication>
4. Verdú, S. (1998). Multiuser detection. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/9780521593731>
5. Stepanenko, Yu. H., Prykhodko, S. I., & Lysechko, V. P. (2009). Metod vyznachennia periodu prokhodzhennia korotkykh videoimpulsiv v kodovykh poslidoynostiakh na osnovi aproksymatsii funktsii Khevisaida [Method for determining the passage period of short video pulses in code sequences based on approximation]

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- of the Heaviside function]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, (4 (20)), 170–173. [in Ukrainian].
6. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 7–14. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1>
 7. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Method for synthesis of ensembles of complex time-division signals with a periodic structure for ultra-wideband multiple access systems. In *Theory and practice of modern science in conditions of transformations: Proceedings of the scientific and practical conference*, 142–144. Molodyi Vchenyi Publishing House.
 8. Zhuchenko, O., Indyk, S., & Zablotskyi, V. (2026). Study of properties of complex time-division signal ensembles with a periodic structure for ultra-wideband code-division multiple access systems. *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: Osvita, nauka, vyrobnytstvo [Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production]*, (63), 310–317. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-34>
 9. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Justification of requirements for a structural efficiency indicator of unequal-energy complex signal ensembles in code division multiple access systems. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu [Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport]*, (216), 187–198. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362542>
 10. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of equivalent transformations of unequal-energy complex signal ensembles in code-division multiple access systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (62), 337–345. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38>
 11. Zhuchenko, O. S., & Shubina, H. V. (2026). Theoretical foundations of equivalent transformation of unequal-energy complex signal ensembles for code division multiple access systems. *Naukoiemni tekhnologii [Science-based technologies]*, (2(70)), 205–211. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.70.21196>
 12. Klenke, A. (2020). Probability theory: A comprehensive course (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56402-5>
 13. Steele, J. M. (2004). The Cauchy-Schwarz master class: An introduction to the art of mathematical inequalities. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817106>
 14. Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
 15. Hill, M. O. (1973). Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54 (2), 427–432. <https://doi.org/10.2307/1934352>
 16. Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113 (2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
 17. Chao, A., Chiu, C.-H., & Jost, L. (2010). Phylogenetic diversity measures based on Hill numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365 (1558), 3599–3609. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0272>
 18. Chiu, C.-H., & Chao, A. (2014). Distance-based functional diversity measures and their decomposition: A framework based on Hill numbers. *PLoS ONE*, 9 (7), Article e100014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100014>

Список використаних джерел

1. Sklar, B. (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, <https://www.informit.com/store/digital-communications-fundamentals-and-applications-9780130847881>
2. Ipatov, V. P. (2005). Spread Spectrum and CDMA: Principles and Applications. Chichester : John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470091800>
3. Viterbi, A. J. (1995). CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication. Reading : Addison-Wesley. <https://www.ece.ucsd.edu/faculty-research/books-by-faculty/cdma-principles-of-spread-spectrum-communication>
4. Verdú, S. (1998). Multiuser Detection. Cambridge : Cambridge University Press, <https://www.cambridge.org/9780521593731>
5. Степаненко, Ю. Г., Приходько, С. І., & Лисечко, В. П. (2009). Метод визначення періоду проходження коротких відеоімпульсів в кодових послідовностях на основі апроксимації функції Хевісайда. *Системи озброєння і військова техніка*, 4 (20), 170–173.
6. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The Formation Method of Complex Signals Ensembles by Frequency Filtration of Pseudo-Random Sequences with Low Interaction in the Time Domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, 7–14. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1>
7. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Method for Synthesis of Ensembles of Complex Time-Division Signals with a Periodic Structure for Ultra-Wideband Multiple Access Systems. *Theory and Practice of Modern Science in Conditions of Transformations : Proceedings of*

- the Scientific and Practical Conference*, Poltava, April 24–25, 2026. Odesa : Molodyi Vchenyi Publishing House, 142–144.
8. Zhuchenko, O., Indyk, S., & Zablotskyi, V. (2026). Study of properties of complex time-division signal ensembles with a periodic structure for ultra-wideband code-division multiple access systems. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк, 63, 310–317. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-34>
 9. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Justification of requirements for a structural efficiency indicator of unequal-energy complex signal ensembles in code division multiple access systems. *Зб. наук. праць Укр. Держ. ун-ту залізнич. трансп.*, 216, 187–198. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362542>
 10. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of Equivalent Transformations of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code-Division Multiple Access Systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, 62, 337–345. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38>
 11. Zhuchenko, O. S., & Shubina, H. V. (2026). Theoretical foundations of equivalent transformation of unequal-energy complex signal ensembles for code division multiple access systems. *Наукові технології*, 2 (70), 205–211. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.70.21196>
 12. Klenke, A. (2020). Probability Theory: A Comprehensive Course. 3rd ed. Universitext. Cham : Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56402-5>
 13. Steele, J. M. (2004). The Cauchy-Schwarz Master Class: An Introduction to the Art of Mathematical Inequalities. Cambridge: Cambridge University Press, 318. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817106>
 14. Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
 15. Hill, M. O. (1973). Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54 (2), 427–432. <https://doi.org/10.2307/1934352>
 16. Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113 (2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
 17. Chao, A., Chiu, C.-H., & Jost, L. (2010). Phylogenetic diversity measures based on Hill numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 1558, 3599–3609. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0272>
 18. Chiu, C.-H., & Chao, A. (2014). Distance-based functional diversity measures and their decomposition: A framework based on Hill numbers. *PLoS ONE*, 9, 7. Article e100014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100014>

Оцінювання енергії заважаючих сигналів у системі множинного доступу з кодовим розділенням на основі різноенергетичних складних сигналів для користувачів, схильних до впливу на них ефекту домінування сигналів із боку інших користувачів

У системі множинного доступу з кодовим розділенням під час приймання сигналу користувачем сигнали інших користувачів вважають для нього такими, що заважають і створюють завади множинного доступу. Для ансамблів різноенергетичних складних сигналів нерівномірність розподілу енергії зумовлює відмінність сумарної енергії заважаючих сигналів для різних користувачів і прояв ефекту домінування. Користувачі з меншими енергіями корисних сигналів можуть бути схильними до впливу домінування сигналів із боку інших користувачів. Метою дослідження є оцінювання енергії заважаючих сигналів для користувачів, схильних до впливу на них ефекту домінування сигналів із боку інших користувачів як песимістичної оцінки для ансамблю в цілому. Для зведення сукупності індивідуальних значень до однієї оцінки застосовано еквівалентне перетворення ансамблю різноенергетичних складних сигналів в умовний ансамбль сигналів з однаковими енергіями зі збереженням сумарної енергії. Установлено, що оцінка нормованої сумарної енергії заважаючих сигналів для користувачів, схильних до впливу на них ефекту домінування сигналів із боку інших користувачів, наближено відповідає структурному еквівалентному об'єму та є песимістичною оцінкою для ансамблю різноенергетичних складних сигналів у цілому. Для ансамблів рівноенергетичних складних сигналів структурний еквівалентний об'єм збігається з об'ємом вихідного ансамблю, що відповідає відсутності нерівномірності розподілу енергії сигналів. Із зростанням ступеня нерівномірності розподілу енергії сигналів ансамблю структурний еквівалентний об'єм монотонно збільшується до верхньої межі, яка відповідає зосередженню сумарної енергії ансамблю в одному сигналі, тобто найбільшій нерівномірності розподілу енергії за сталої сумарної енергії сигналів. Отже, структурний еквівалентний об'єм ансамблю різноенергетичних складних сигналів, який є розрахунковою кількістю рівноенергетичних складних сигналів в ансамблі, еквівалентному вихідному за сумарною енергією сигналів, збільшується зі зростанням ступеня нерівномірності розподілу енергій сигналів, відповідає песимістичній оцінці нормованої сумарної енергії заважаючих сигналів для користувачів, схильних до впливу домінування сигналів із боку інших користувачів, і дає змогу поширити показники ефективності, призначені для ансамблів рівноенергетичних складних сигналів, на ансамблі різноенергетичних складних сигналів через

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

підстановку величини структурного еквівалентного об'єму у відповідні співвідношення для ансамблів рівноенергетичних складних сигналів.

Ключові слова: система множинного доступу з кодовим розділенням, завади множинного доступу, енергія заважаючих сигналів, ансамбль різноенергетичних складних сигналів, структурний еквівалентний об'єм, вплив домінування сигналів із боку інших користувачів, взаємна кореляція сигналів.

Panchenko Serhii Volodymyrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID ID: 0009-0002-2833-4347.

Zhuchenko Oleksandr Serhiiiovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Lysechko Volodymyr Petrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Indyk Serhii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID ID: 0009-0002-2833-4347.

Жученко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Лисечко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Індик Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Стаття надійшла 10.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 18.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

УДК 004:656.2(477)

DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i3.371953>

KUSHCH M.Y., Master of Science,

ABBASOV O.O. Master of Science,

KANEVSKYI M.V., Master of Science

SHCHEBLYKINA O.V. PhD, Associate Professor, Department “Automation and computer telecontrol of trains”

(Ukrainian state university of railway transport)

A comparative analysis of edge and cloud computing architectures for rolling stock monitoring systems

Abstract

This paper presents a quantitative comparison of Edge- and Cloud-oriented processing of technical-condition monitoring data for high-speed railway (HSR) rolling stock, based on a verified discrete-time digital twin of a train. Unlike approaches that treat Edge and Cloud as separate, independent configurations, the model simultaneously computes both processing pipelines within a single run, including a stochastic radio channel (correlated fading, Doppler-induced degradation, HARQ with residual block error), priority-based scheduling of two traffic classes (safety-critical and monitoring), and a thermal model of the on-board computer with throttling. A hybrid architecture mode, in which Edge pre-filters monitoring traffic before forwarding it to the Cloud, is additionally implemented and empirically evaluated. The full factorial design shows that the two architectures are bottlenecked by fundamentally different mechanisms: the Cloud degrades due to the physical unavailability of the radio channel, whereas Edge degrades due to thermal throttling under insufficient cooling. The simultaneous action of both factors drives the share of the critical *Both Down* state to a substantial fraction of the total observation time, whereas increasing the thermal headroom of the hardware platform alone is sufficient to reduce this share several-fold. Hybrid filtering delivers a measurable reduction in network traffic both under nominal conditions and under active anomalous load, but the accompanying ML-inference compute load measurably erodes the Edge node's thermal headroom. Local computation proved substantially more energy-costly than radio transmission of the same volume of data. The results quantitatively substantiate the need for a redundant hybrid monitoring architecture in which no single subsystem constitutes a single point of failure.

Keywords: Edge computing, Cloud computing, digital twin, rolling stock monitoring, IoT, predictive maintenance, Age of Information, QoS, rail transport.

Introduction

Railway operation under rigid schedules of preventive maintenance has exhausted its efficiency potential. Under high-speed conditions, this approach becomes an economic burden: sound components are often replaced prematurely out of excessive caution, while critical defects develop in the “blind spots” between scheduled inspections [1]. This problem is pushing operators toward condition-based maintenance (Predictive Maintenance – PdM), where intervention decisions rely not on a calendar but on objective monitoring data. However, the technical implementation of PdM has created an unprecedented challenge for the data-transmission infrastructure. Modern rolling stock is saturated with heterogeneous sensing: from vibration accelerometers polling axle-box units at rates of up to 50 kHz, to thermal imagers and machine-vision cameras that

generate “heavy” video traffic [2]. In a single day, a single train can generate tens of terabytes of telemetry. This intensity moves the monitoring task into the realm of Big Data, where the critical parameter is not merely the volume of stored data but the speed of its processing (Velocity) [3]. Attempting to transmit this volume of information in real time runs into the physical limitations of the train-to-ground channel. The GSM-R standard is technologically obsolete for such tasks, while LTE/4G networks, despite their nominal throughput, demonstrate instability under specific railway conditions. High linear speed (over 300 km/h) causes the Doppler effect and frequent handovers between base stations, leading to packet loss and jitter. The situation worsens in tunnels and mountainous terrain, where radio-shadow zones arise that effectively isolate on-board systems from the outside world [4], [5]. This creates a classic engineering dilemma. A centralized cloud architecture (Cloud Computing)

©KUSHCH M, ABBASOV O, KANEVSKYI M, SHCHEBLYKINA O.,2026

offers powerful resources for in-depth analysis and model training but becomes helpless when the communication channel degrades. The alternative – edge computing (Edge Computing) – allows data to be processed directly on board, minimizing latency, but is tightly constrained by the power consumption and computing capacity of local nodes [6]. The research gap lies in the absence of formalized criteria for choosing between these architectures specifically for the railway context. Most studies examine them in isolation, ignoring the dynamics of the communication channel at high speeds.

The aim of this work is to quantitatively determine the bifurcation point: the network and load parameters beyond which the advantages of a centralized cloud are negated by latency, and the resources of local nodes are exhausted – providing an objective technical basis for migrating to adaptive hybrid architectures.

Literature Review and Problem Statement

2.1. Evolution of Monitoring in Intelligent Transportation Systems (ITS)

The development of ITS in the railway sector has progressed from periodic inspections and passive telemetry (event logs, SCADA, on-board recorders) to continuous IoT-based monitoring and Predictive Maintenance (PdM). A systematic review of railway condition-monitoring methods published in *Sensors* (2021) shows that recent decades have seen a shift from manual, periodic inspections to on-board and trackside sensor systems, as well as toward the analysis of “heavy” time-series data using machine learning and deep networks for anomaly detection and failure prediction [7].

A separate review of PdM specifically for the railway industry emphasizes that current approaches rely on massive volumes of data from vibration, acoustic, thermal, and current sensors, which generate continuous data streams for the running-gear, catenary, switch, and track subsystems, among others [8]. The authors note that the shift from preventive to predictive maintenance improves rolling-stock availability but sharply increases the demands on data collection, storage, and processing, giving rise to what might be called “Big Data on Rails.”

The role of open and industry-specific datasets is likewise growing. A review of public AI-oriented railway datasets documents the emergence of large collections of images, video, vibration signals, and telemetry for track, rolling-stock, and infrastructure diagnostics [9]. A significant share of these datasets contain millions of measurements, which indirectly confirms the industry-wide growth in data volumes. This is complemented by the publication of real operational data: for example, a dataset for Chinese high-speed rail combines detailed train-movement logs with weather data and is specifically oriented toward big-data analysis for operational planning and reliability [10].

In the broader context of ITS and road transport, the review “When Intelligent Transportation Systems Sensing Meets Edge Computing” (*Appl. Sci.*, 2021) describes how the expansion of sensing modalities (video, LiDAR, radar, mobile devices) has made it unrealistic to stream complete “raw” data flows to the cloud, given bandwidth and latency constraints [11]. The authors explicitly call for a shift toward distributed processing (edge/fog), where the cloud is used mainly for offline analytics and long-term storage.

Thus, in both the railway and automotive segments of ITS, the current monitoring paradigm involves high-intensity, continuous data streams (vibration, video, thermography, high-frequency telemetry) that are used not only for ex-post diagnostics but also for prediction and failure prevention. This creates a fundamental tension between data volumes and the limitations of transport channels, particularly in high-speed scenarios.

2.2. A Critical Analysis of Cloud-Centric Approaches

A substantial number of contemporary PdM architectures for the industrial and transport sectors treat the cloud as a natural center of gravity, owing to its practically unlimited computing and storage resources. For example, the TIP4.0 platform (*Sensors*, 2021) implements a fully cloud-centric approach to PdM: sensors transmit data to a scalable cloud platform, where stream-processing pipelines and deep neural networks perform diagnostics [12]. Similarly, for railway bridges, a 2024 study in *Sensors* presents a digital twin in which low-cost wireless accelerometers transmit complete time series to a cloud infrastructure for spectral analysis and anomaly classification [13].

“Railway Cloud: Management and Orchestration Functionality Designed as Microservices” (*Appl. Sci.*, 2024) generalizes the vision of a “railway cloud” that hosts virtualized control and monitoring functions as well as rolling-stock maintenance services; the authors highlight the benefits of scalability, resource reuse, and centralized service-lifecycle management [14]. Thus, a number of works present the cloud as the natural foundation for PdM and ITS analytics owing to its elasticity, simplified algorithm updates, and capacity for global data aggregation.

However, a review of 5G for Railways (5G-R) shows that under real high-speed-railway conditions, the cloud-centric approach runs into severe physical limitations of the communication channel. Reference [15] systematizes the requirements for FRMCS/5G-R: for operations- and safety-related services, the target end-to-end latency must be <100 ms at speeds up to 500 km/h and 99.9999 % reliability. For earlier technologies, the paper cites indicative end-to-end latency figures of roughly 500 ms for GSM-R and 200-500 ms for LTE-R,

versus 1-10 ms for 5G (under idealized core-access conditions). The work also identifies a number of fundamental radio-engineering constraints. The average penetration loss into the body of a high-speed train for frequencies up to 6 GHz is 25-35 dB, which sharply degrades the SNR for passenger and on-board services. At a carrier frequency of 2.1 GHz and a speed of 350 km/h, the Doppler shift exceeds 680 Hz, complicating demodulation and channelization, particularly under rapidly varying multipath conditions. The paper further emphasizes that, unlike GSM-R, the smaller cell sizes required by the higher frequencies of 5G-R lead to a substantially higher handover rate, including group handovers, which creates risks of delay and congestion in critical scenarios.

A study of radio-communication scenarios for 5G-R classifies 18 typical scenarios in detail (viaducts, cuttings, tunnels, platforms, on-board, depots, etc.) and defines target user-experience parameters for each. For most “linear” scenarios (viaduct, tunnel, urban, rural), the expected throughput is 0.1-1 Gbit/s with 10-100 ms latency, while platforms, stations, and on-board scenarios require 1-10 ms latency under high connection density [16]. The authors separately highlight compound scenarios (e.g., groups of tunnels), where rapid transitions between different radio environments produce “severe fading” and reduced link quality.

Regarding tunnels, [He et al., 2021] describes them as waveguide environments with numerous reflections, where leaky coaxial-cable coverage is often used; in compound “tunnel-group” scenarios, repeated tunnel entries and exits substantially complicate the maintenance of stable service quality. Analogous studies of urban metro systems at the 28 GHz mm-wave band show that tunnels exhibit significant additional loss and an attenuation profile that is highly sensitive to geometry, limiting achievable range and requiring dense placement of antennas or repeaters [17].

Even in road V2X scenarios supported by MEC infrastructure, where distances to edge nodes are considerably smaller, achieving stable URLLC latency remains difficult. For instance, a microservice-based MEC architecture for warning vulnerable road users achieved a maximum end-to-end latency of about 110 ms in real-world trials, which only marginally meets the requirements of active-safety systems [18]. This indicates that even with computation placed “at the edge,” achieving <100 ms latency is not straightforward; for railways, with their long routes to centralized cloud data centers, multiple handovers, and tunnels, reliance solely on cloud processing for real-time operation appears even less viable.

Finally, work on MEC-assisted high-speed railways largely focuses on maximizing throughput or minimizing energy consumption, but operates with idealized communication models. For example, a study on

maximizing the throughput of offloaded tasks in an MEC network for high-speed rail focuses on task upload/download routing and the impact of handovers on the number of served tasks, without a detailed analysis of end-to-end latency under prolonged coverage loss [19]. A similar situation is found in FRMCS-oriented work on tuning handover parameters to meet target latency requirements: control schemes are examined in detail, but comparative analyses of different splits of computation between the on-board unit and the cloud during prolonged channel outages are absent [20].

In summary, while the cloud remains indispensable for long-term storage, global analytics, and model training, the existing literature points to a fundamental mismatch between the URLLC/PdM requirements of high-speed rail and the typical latencies and instability of LTE-R/5G-R channels at speeds >300 km/h, particularly in tunnels and compound scenarios.

2.3. The Emergence of Edge and Fog Computing in Transport

Against the backdrop of the limitations of purely cloud-based solutions in transport, the edge/fog computing paradigm is actively taking shape. A review combining ITS sensing with edge processing [11] and a taxonomy of edge-cloud computing for ITS and connected vehicles [21] describe a multi-layered architecture: vehicles and roadside units (RSUs) act as edge nodes, above them sit municipal or operator-run MEC platforms, and above those, the centralized cloud. The key principle is that time-critical tasks (V2X cooperation, local obstacle detection, basic PdM) are performed at the nearest available level, while the cloud handles “heavy” model training, long-term analytics, and the aggregation of historical data.

Concrete examples demonstrate just how radically edge processing can reduce the load on backhaul channels. A 2023 Sensors study proposes an edge system for traffic-flow classification: video is processed at a node located near the camera, and only aggregated indicators are transmitted to the cloud. During field trials (≈10,000 vehicles per day), the average bandwidth required between the edge node and the cloud was only about 1.5 MB/hour, with a classification accuracy of 93.2 % and average speed-estimation accuracy of 82.9 % [22]. Such a result would be practically impossible under a purely cloud-based model, which would need to transmit full video streams.

Similar trends can be traced in V2X research. A review of edge computing for Vehicle-to-Everything shows that edge computing is proposed as a means of simultaneously reducing latency, addressing dynamic-handover issues, and lowering network load in scenarios involving large volumes of V2X data [23]. Individual studies on “electric, connected, autonomous, and shared” vehicles describe the vehicles themselves as edge

microservers on wheels, locally processing enormous streams of sensor data and exchanging already “condensed” information with other vehicles and infrastructure [24].

In the railway context, this logic has already begun to be implemented. A 2021 Appl. Sci. paper proposes a fault-diagnosis and visualization method for high-speed trains based on edge-cloud collaboration: a deep SAES-DNN model is trained in the cloud on large volumes of historical data and then deployed to on-board or trackside edge nodes for real-time execution, with model updates carried out via transfer-learning mechanisms [25]. In this scheme, the most computationally intensive operations (training) are performed in the cloud, while latency-sensitive inference is performed at the edge.

“High-speed Train Intelligent Maintenance Pattern and Edge-Computing Perception Model” (2021) describes a three-tier “Cloud-Edge-Terminal” architecture for intelligent maintenance of electric multiple units: the edge tier handles real-time, Finite State Machine (FSM)-oriented data processing, while the cloud aggregates information from the entire train fleet and performs large-scale analytics [26].

Frontiers (2021) presents the concept of Edge Intelligence in Private Mobile Networks for Next-Generation Railway Systems, in which local private 5G/FRMCS networks with embedded edge servers are used to implement “in-network intelligence” – local analytics for PdM, environment monitoring, and video analytics – without the need to transmit all data to a centralized cloud [27].

There are also instructive examples involving comparatively “lighter” sensor streams. In “Continuous Monitoring of Train Parameters Using IoT Sensor and Edge Computing” (2021), a MEMS sensor mounted on the rail locally processes vibration signals to estimate train speed and axle load, after which the results – rather than the “raw” signals – are transmitted over NB-IoT to the cloud; the system provides round-the-clock monitoring with low energy consumption and without occupying the track [28]. Similarly, a 3D-LiDAR detection system at level crossings performs complete point-cloud processing on an embedded edge platform, sending only the final obstacle warning to the train [29].

A separate line of research concerns computation-offloading tasks in the “railway IoT” (RIoT). A 2024 Electronics paper proposes a computation-offloading strategy for detection tasks in RIoT with integrated sensing, storage, and computing functions: both direct and relay transmission schemes using NOMA are considered, and the problem of minimizing the relative delay (delay ratio) is solved via a modified DDPG algorithm [30]. The authors show that an optimal mixed offloading solution (between local nodes and MEC

servers) substantially reduces average delay compared with simple policies, but the analysis is conducted mainly in terms of time and energy, without accounting for prolonged, complete connectivity outages.

A 2022 IEEE paper on multi-access MEC in RIoT proposes a hybrid DRL approach (DDQN + DDPG) for the joint optimization of sub-carriers, offloading ratios, transmit power, and computing resources, with the goal of minimizing a weighted sum of delay and energy consumption [31]. The authors demonstrate near-optimal solutions through policy learning; however, as in the previous case, a relatively stable channel is assumed, and “connectivity failure” is not treated as a central scenario.

Finally, a 2023 PeerJ paper on optimizing a railway logistics-center layout considers a “mobile cloud-edge computing” architecture in which tasks can be executed on on-board devices, on edge servers, or in the cloud; simulation shows that this two-tier scheme reduces latency by roughly 40 % compared with alternative task-allocation strategies [32]. However, that scenario is oriented more toward logistics than toward the safety-critical monitoring of rolling stock under harsh radio-communication conditions.

In sum, the literature demonstrates a clear trend toward the use of edge/MEC in transport (including railways) to reduce latency and network load, but these solutions are mostly developed either for isolated tasks (local detection, bridge SHM) or in the context of idealized communication models, without a full comparison of edge and cloud architectures under identical mobility and channel-constraint conditions.

2.4. Research Gap

The review of the literature above makes it possible to identify three relatively isolated strands of research: 1) PdM and monitoring in the railway industry, 2) the radio-engineering aspects of FRMCS/5G-R, and 3) MEC/edge computing in ITS and RIoT.

1. PdM and railway monitoring. Works [7] and [8] focus on data-analysis algorithms (ML/DL, anomaly detection, remaining-useful-life prediction), paying less attention to the placement of computing resources. Architectural assumptions are often implicitly cloud-centric – it is assumed that complete arrays of “heavy” data (including video and high-frequency vibration) can be delivered to a data center. Railway digital-twin applications confirm this approach: in [13], complete time series, after minimal pre-processing, are sent to the cloud for analysis, bypassing the channel constraints characteristic of high-speed operation.

2. LTE-R/5G-R radio channels. Work on 5G-R characterizes in detail the requirements for latency, reliability, and throughput, as well as the phenomena associated with high speed: Doppler shift, coverage gaps in tunnels, group handovers, and so on [15], [16].

However, these works essentially do not analyze how specific monitoring architectures (edge vs. cloud) behave under these conditions. For example, it is established that GSM-R yields ~500 ms of end-to-end latency, LTE-R yields 200-500 ms, and 5G-R is expected to deliver <100 ms for critical services, but no analysis is offered of what fraction of the time these requirements are actually met during operation at >300 km/h with repeated tunnel entries, nor of the implications for PdM systems that rely entirely on the cloud.

3. **MEC/edge in RIoT and ITS.** MEC solutions for railways mostly focus on formulating optimization/DRL problems for offloading and resource allocation, with the goals of minimizing latency or energy or maximizing throughput [19, 30, 31]. In doing so,

- **the channel is typically modeled as an ideally controlled resource** with known fading/noise statistics, but without the prolonged complete outages (blackouts) characteristic of tunnels, compound scenarios, and poorly covered segments;

- the analysis is conducted **at the level of average delay/energy**, without assessing the “survival” of safety functions in worst-case scenarios (for example, whether a crack/overheat detector remains able to function during a 5-30-second loss of network connectivity);

- comparisons are usually made between different offloading policies within a single MEC architecture, rather than between “pure edge” (all critical computation performed on board) and “pure cloud” (all “heavy” data offloaded to the center).

As for **heavy data types** (high-frequency vibration signals, high-resolution video, thermal images) for rolling stock at speeds >300 km/h, existing studies typically either:

- confine themselves to **local tasks** (monitoring of a single track segment [28] or a level crossing [29]), where the channel to the cloud is not a “bottleneck”; or

- consider **idealized 5G/5G-R conditions**, where throughput and latency correspond to nominal values (e.g., 0.1-1 Gbit/s and 10-100 ms for linear scenarios [16]), without capturing tunnel-waveguide effects, 25-35 dB penetration losses, frequent handovers, or the instability of group handovers [15].

This makes it possible to formulate the **key gap**:

- existing studies either focus on **processing/compression algorithms** (PdM, ML/DL), or on **radio-level/network technologies** (URLLC, handover, FRMCS), but **almost never combine** these two aspects within a single experimental or modeling framework capable of assessing the safety system’s ability to “survive” channel degradation or failure;

- there are practically no studies that **introduce reliability metrics for the monitoring system under connectivity-failure conditions** (for example, the probability of missing a critical defect under scenario X for architecture A vs. B), and that examine how the choice between edge and cloud affects these metrics for given channel characteristics (in particular, handover delays, Doppler-shift magnitudes, and tunnel blackout durations);

Problem statement. The scientific problem addressed by this paper is formulated as the **absence of a scientifically grounded, quantitative comparison of edge and cloud computing architectures for high-speed-train rolling-stock monitoring systems** that would:

- account for **the realistic constraints of railway communication channels** (GSM-R/LTE-R/5G-R, including tunnels, compound scenarios, group handovers, and high Doppler shift);

- operate with **heavy data types** (vibration, video, thermography) characteristic of modern PdM and safety systems;

- evaluate not only average latency and throughput but also **viability metrics for safety functions** under connectivity degradation/loss (for example, the maximum allowable connectivity-outage duration for which an edge architecture remains able to sustain the required level of safety, whereas a cloud architecture does not).

The comparison of “pure edge” and “pure cloud” proposed in this paper under such conditions will help close this gap, providing quantitatively substantiated arguments for choosing a rolling-stock monitoring architecture in the era of FRMCS/5G-R and railway big data.

Aim and Objectives of the Study

Aim: to quantitatively compare Edge- and Cloud-oriented processing of HSR rolling-stock monitoring data in terms of latency, reliability (Reliability, expressed as Packet Loss Ratio and the share of time spent in each of four operating states), data timeliness (Age of Information), and network-traffic volume, and to empirically assess the feasibility of a hybrid architecture in which the Edge node pre-filters data before forwarding it to the Cloud.

Objectives:

1. Develop a formalized data-flow model split into two QoS priority classes – safety-critical (vibration diagnostics, axle-box temperature) and monitoring (video) – reflecting the real heterogeneity of rolling-stock telemetry.

2. Build a mathematical model of end-to-end latency, packet-loss ratio, and age of information separately for the Edge and Cloud processing pipelines, including a stochastic radio-channel model (correlated fading, Doppler-induced degradation, HARQ) and a thermal model of the on-board computer with throttling.

3. Implement two architecture modes – direct duplication of the raw stream to both subsystems (baseline) and hybrid filtering, in which Edge forwards only a compressed version of the monitoring traffic to the Cloud – and quantitatively evaluate the resulting network-traffic savings.

4. Perform simulation modeling of system operation under unstable connectivity (tunnels, NLOS zones, handovers) and a varying thermal headroom of the on-board computer (three hardware profiles) within a full factorial experimental design.

5. Determine the boundary conditions (state bifurcations) at which each architecture loses stability, and quantitatively compare the physical energy consumption of local computation against the energy cost of radio transmission.

Both processing pipelines (Edge and Cloud) run **in parallel within a single digital twin** for every simulation run, and the hybrid architecture is **implemented and quantitatively evaluated** as part of this study. The simulation is implemented as a custom discrete-time simulator in Python with a fixed sampling step $\Delta t = [\Delta t = 0,01]$ s, ensuring synchronous updates of the two parallel processing pipelines at every tick.

Methodology and System Modeling

4.1. Formalization of the Cyber-Physical Monitoring Architecture

We consider a digital twin of a rolling-stock technical-condition monitoring system operating under high-speed conditions (High-Speed Railway, HSR). The architecture is formalized as a directed graph $G = (V, E)$, where $V = V_{sens} \cup V_{edge} \cup V_{cloud}$ is the set of nodes (vibration and temperature sensors, video cameras, the On-Board Unit computer, the cloud server), and E is the set of communication links (the internal OBU bus and the wireless uplink to the cloud).

Both processing pipelines are built **in parallel within a single digital twin** (the TrainDigitalTwin class): the volume of data generated at step t is simultaneously fed into both the local Edge processing queue and, after being transformed by the architecture mode (Section 4.7), the Cloud transmission queue. In addition, a **hybrid architecture mode** (ArchitectureMode.HYBRID_FILTERED) is provided, in which Edge pre-filters data before forwarding it to the Cloud, making it possible to evaluate not only fault tolerance but also the **actual traffic savings** achieved through local processing (Section 4.7).

Each unit of traffic belongs to one of two QoS priority classes (PriorityClass)

$$c(t) \in \{ \text{SAFETY}, \text{MONITORING} \}, \quad (1)$$

where SAFETY combines vibration diagnostics and axle-box temperature, while MONITORING denotes the video stream.

For each class, the latency, packet-loss ratio (PLR), and age of information (AoI) are computed separately in each subsystem; based on the aggregated (worst-per-class) values of these metrics, the system is classified at every step into one of four states (Section 4.8).

4.2. Mathematical Model of Traffic Generation

The input information flow of the SAFETY class is formed by vibration diagnostics (axle-box accelerometers) and axle-box temperature:

$$\lambda_{safety}(t) = \underbrace{N_{vib} \cdot f_s \cdot B_{vib} \cdot \xi_{vib}(t)}_{\text{vibration diagnostics}} + \underbrace{N_{temp} \cdot f_{temp} \cdot B_{temp} \cdot \xi_{temp}(t)}_{\text{axle-box temperature}}, \quad (2)$$

where $N_{vib} = 8$;

$$f_s = 50 \times 10^3 \text{ Hz};$$

$B_{vib} = 24$ bits (the product of $\approx 9,6$ Mbit/s – the nominal vibration-diagnostics bitrate);

$$N_{temp} = 8, f_{temp} = 10 \text{ Hz};$$

$B_{temp} = 16$ bits (a low-frequency channel, since the thermal process in the axle box is much slower than vibration);

$\xi_{vib}(t), \xi_{temp}(t) \sim U(0,95; 1,05)$ is multiplicative noise of the measurement paths.

Traffic of the MONITORING class (video) is modeled as a two-state Markov-modulated Poisson process (MMPP):

$$\lambda_{monitoring}(t) = N_{cam} \cdot R_{video}(t) \cdot k_{anomaly}(t), \quad R_{video}(t) = \begin{cases} R_{min} \cdot \xi_v(t), & \text{"low activity"} \\ R_{max} \cdot \xi_v(t), & \text{"high activity"} \end{cases}, \quad (3)$$

where $N_{cam} = 2$;

$$R_{min} = 4 \text{ Mbit/s};$$

$$R_{max} = 12 \text{ Mbit/s};$$

$\xi_v(t) \sim U(0,9; 1,1)$, state switching is a Bernoulli trial with probability $p_{MMPP} = 0,05$ at each step;

$k_{anomaly}(t)$ is the multiplier (4) active during an Anomaly Burst.

4.3. Model of Event-Driven Load (Anomaly Burst)

The binary anomalous-load process $A(t) \in \{0,1\}$ is activated by a Bernoulli trial with probability $p_a = 0,0008$ at each step of the inactive state and is held fixed for $T_a = 3,0$ s:

$$k_{anomaly}(t) = \begin{cases} k_v = 5,0, & A(t) = 1 \\ 1, & A(t) = 0 \end{cases} \quad U(t)|_{A(t)=1} \leftarrow \min(1, U(t) + \Delta U), \quad \Delta U = 0,4$$

where $U(t)$ is the CPU utilization of the Edge node (7).

The theoretical steady-state fraction of time spent in the active state, $P(\text{active}) \approx p_a T_a / (p_a T_a + \Delta t) \approx 19,4\%$ is used as an internal sanity check on the correctness of the random-event generator implementation.

4.4. Stochastic Model of the HSR Radio Channel

The communication channel accounts for three elements of realism essential to an HSR route: time-correlated fading, a triangular signal-level droop profile near the cell edge, and a probabilistic model of residual block error accounting for HARQ.

Doppler shift. At train speed v (km/h) and carrier frequency $f_c = 2,1$ GHz:

$$f_d = \frac{v/3,6}{c} f_c, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s.} \quad (5)$$

Correlated shadow fading.

The effective signal level is modeled by a Gauss-Markov AR(1) process in the dB domain, with autocorrelation dependent on the channel coherence time (rather than being redrawn independently at every tick, which would ignore the physical inertia of fading):

$$\tau_c \approx \frac{1}{k_{coh} \cdot f_d}, \quad \rho = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_c}},$$

$$SNR_{dB}(t) = \mu_S + \rho(SNR_{dB}(t - \Delta t) - \mu_S) + \sigma_S \sqrt{1 - \rho^2} \mathcal{N}(0,1) \quad (6)$$

where $k_{coh} = 4$ (FADING_COHERENCE_FACTOR);

$$\mu_S = 29,5 \text{ dB}, \quad \sigma_S = 1,5 \text{ dB for LOS};$$

$$\mu_S = 19,0 \text{ dB}, \quad \sigma_S = 3,0 \text{ dB for NLOS}.$$

Triangular droop near the cell edge. A deterministic trend of position within the inter-handover interval is additionally taken into account:

$$\text{droop}_{dB} = -(1 - (1 - |2p - 1|)) \cdot \Delta_{edge}, \quad p = \frac{x - x_{HO}}{L_{HO}} \in [0,1] \quad (7)$$

where $\Delta_{edge} = 2$ dB (PATHLOSS_CELL_EDGE_DROOP_DB) is the maximum additional attenuation at the cell edge relative to its center.

Throughput with MCS derating. The effective SNR after Doppler-induced degradation is converted into throughput via the Shannon-Hartley theorem, discounted by the spectral-efficiency factor of the actual modulation-and-coding scheme:

$$SNR_{eff}(t) = 10^{\frac{(SNR_{dB}(t) + \text{droop}_{dB})}{10}} \cdot e^{-\frac{f_d}{f_{decay}}},$$

$$C_{real}(t) = \eta_{MCS} \cdot B_w \cdot \log_2(1 + SNR_{eff}(t)), \quad (8)$$

where $f_{decay} = 500$ Hz, $B_w = 20$ MHz, $\eta_{MCS} = 0,75$ (SPECTRAL_EFFICIENCY_FACTOR).

HARQ and residual BLER. Rather than a hard “channel available / channel unavailable” switch at the throughput level, a probabilistic block-error model is introduced as a sigmoid function of the effective SNR (dB), with HARQ combining across up to $N_{HARQ} = 2$ retransmissions:

$$BLER_1(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{(SNR_{eff, dB}(t) - \theta_B)/s_B}{BLER_1(t)^{N_{HARQ}+1}}\right)}, \quad BLER_{HARQ}(t) = BLER_1(t)^{N_{HARQ}+1}, \quad (9)$$

$$C(t) = C_{real}(t) \cdot (1 - BLER_{HARQ}(t)), \quad \delta_{HARQ}(t) \approx T_{RTT} \cdot BLER_1(t) \quad (10)$$

where $\theta_B = 5$ dB;

$$s_B = 3 \text{ dB};$$

$T_{RTT} = 8$ ms (HARQ_ROUND_TRIP_S) is the expected additional delay due to retransmissions, added directly to the Cloud network-segment delay (14).

Tunnels and handover. If a segment is of type TUNNEL, $C(t) = 0$ for the entire duration of its traversal. A handover has **its own independent duration** $T_{HO} = 0,05$ s (HANDOVER_DURATION_S), independent of the sampling step Δt : as soon as the distance traveled since the previous handover reaches L_{HO} of the segment, the channel is forcibly switched into outage for the entire T_{HO} interval.

4.5. QoS Priority Queue, Thermal Model, and Edge-Node Energy Consumption

The OBU compute node is formalized as a queuing system with a shared buffer of limited capacity $K = 300$ Mbit, serving two priority classes (1) under a **strict-priority** discipline: SAFETY is served first, using the full available capacity $\mu(T_{cpu})\Delta t$, with the remainder allocated to MONITORING; when the buffer overflows, the excess is dropped first from MONITORING (tail-drop), and only as a last resort from SAFETY.

The thermal dynamics and throttling are described by the equations:

$$C_{th} \frac{dT_{cpu}(t)}{dt} = P_{active} \cdot U(t) - \frac{T_{cpu}(t) - T_{amb}}{R_{th}},$$

$$\mu(T_{cpu}) = \begin{cases} \mu_{max}, & T_{cpu} \leq T_{crit} \\ \mu_{max} e^{-\alpha(T_{cpu} - T_{crit})} \zeta(t), & T_{cpu} > T_{crit} \end{cases} \quad (11)$$

where $C_{th} = 40$;

$$P_{active} = 35 \text{ W};$$

$$T_{crit} = 75^\circ \text{C}, \quad \zeta(t) \sim U(0,9; 1,0);$$

the parameters R_{th} , T_{amb} , μ_{max} , α are determined by the edge profile (Section 4.9). The utilization $U(t)$ is additionally increased by (4) during an Anomaly Burst and by $\Delta U_{ML} = 0,10$ (ML_INFERENCE_EXTRA_UTILIZATION) when the hybrid-filtering mode is active (Section 4.7) – local ML inference carries a computational cost that cannot legitimately be ignored.

Age of information, per class. Since SAFETY is served practically instantaneously in the strict-priority queue, computing a single AoI based on the time of the most recently processed data packet (regardless of class) would mask the real staleness of the MONITORING queue behind the near-instant servicing of SAFETY. AoI is therefore computed separately for each class by definition $A(t) = t - U_{class}(t)$, where $U_{class}(t)$ is the generation instant of the most recent fully processed data unit of that class, and the aggregated subsystem indicator is the worse (maximum) of the two:

$$AoI_{edge}(t) = \max(AoI_{edge}^{safety}(t), AoI_{edge}^{monitoring}(t)) \quad (12)$$

Energy. Separately from the thermal equation (11) (so as not to alter the already-verified dynamics), the physical energy consumed by computation is tracked:

$$P_{edge}(t) = P_{idle} + P_{active} \cdot U(t),$$

$$E_{edge} = \int P_{edge}(t) dt + \sum_t \gamma_{ML} \cdot \frac{\text{volume}(t)}{10^6} [\text{ML active}], \quad (13)$$

where $P_{idle} = 5$ W (EDGE_IDLE_POWER_W);

$\gamma_{ML} = 0,02$ J/Mbit (ML_INFERENCE_ENERGY_J_PER_MBIT).

4.6. Network and Server Segments of the Cloud Subsystem

The Cloud subsystem consists of **two sequential segments**: a network segment (the radio channel with a deadline) and a server segment (backend processing).

Network segment – a queue with a deadline (TTL reneging) and QoS priority (1):

$$x(t) = \min(Q_{net}(t), C(t)\Delta t), \quad L_{net}(t) = \frac{Q_{net}(t)}{C(t)} + \delta_{HARQ}(t). \quad (14)$$

A packet whose waiting time exceeds $TTL = 1,5$ s is dropped regardless of $C(t)$.

Server segment. Data that have successfully passed through the radio channel enter a queue of limited backend throughput $\mu_{srv} = 500$ Mbit/s (multi-tenant load from parallel trains), with an additional fixed processing delay of $\delta_{srv} = 20$ ms (writing to the message queue/database):

$$L_{server}(t) = \frac{Q_{server}(t)}{\mu_{srv}} + \delta_{srv}, \quad L_{cloud}(t) = L_{net}(t) + L_{server}(t). \quad (15)$$

$$= \begin{cases} (\lambda_{safety} \Delta t, \lambda_{monitoring} \Delta t), & \text{PARALLEL_RAW} \\ (\lambda_{safety} \Delta t, \rho_c \cdot \lambda_{monitoring} \Delta t), & \text{HYBRID_FILTERED, } A(t) = 0 \\ (\lambda_{safety} \Delta t, \lambda_{monitoring} \Delta t), & \text{HYBRID_FILTERED, } A(t) = 1 \end{cases} \quad (16)$$

where $\rho_c = 0,05$ (EDGE_TO_CLOUD_COMPRESSION_RATIO) is the share of video traffic forwarded as compressed features under normal conditions;

SAFETY is always forwarded in full (small volume, safety-critical), while during an Anomaly Burst MONITORING temporarily reverts to the full raw stream for dispatcher verification (“summary normally, raw evidence on alarm”). The PARALLEL_RAW mode serves as the baseline for comparison, in which Edge and Cloud process an identical full stream independently of one another.

Traffic savings are computed relative to the volume **queued for the channel** ($b_{attempted}$), rather than the volume actually transmitted after the channel, since the latter depends on link quality (losses in a tunnel) rather than on the filtering decision:

$$\text{savings} = 1 - \frac{\sum_t (b_{safety}^{cloud}(t) + b_{monitoring}^{cloud}(t))|_{HYBRID}}{\sum_t (\lambda_{safety}(t) + \lambda_{monitoring}(t)) \Delta t|_{PARALLEL_RAW}}. \quad (17)$$

Table 1

Thermal and computational headroom parameters of the three hardware-platform edge profiles

Profile	T_{amb} , °C	R_{th}	μ_{max} , Mbit/s	α
---------	----------------	----------	----------------------	----------

The server segment is considered reliable (loss-free) – all losses occur in the network segment, where the TTL deadline applies. $AoI_{cloud}(t)$ is computed analogously to (12), separately per class, over packets that have passed through BOTH segments.

4.7. Hybrid Architecture and Traffic Savings

An ArchitectureMode parameter is introduced, defining the volume of data that Edge actually forwards to the Cloud:

$$(b_{safety}^{cloud}(t), b_{monitoring}^{cloud}(t)) =$$

4.8. System State Classification

A subsystem is considered healthy (OK) if the safety thresholds for latency and PLR are simultaneously satisfied:

$$OK(L, PLR) \Leftrightarrow (L < L_{safety}) \wedge (PLR < PLR_{safety}),$$

$$L_{safety} = 0,15 \text{ s}, \quad PLR_{safety} = 2 \%. \quad (18)$$

Applying (18) to the pairs (L_{edge}, PLR_{edge}) and (L_{cloud}, PLR_{cloud}) yields four mutually exclusive states: **Both OK, Cloud Down, Edge Down, Both Down** (Edge OK/not OK $\times$ Cloud OK/not OK).

4.9. Routes, Edge Profiles, and Factorial Design

The study uses four routes (Open terrain, 45 km, LOS, 350 km/h; Deep tunnels, 28 km, with two TUNNEL segments of 8 and 6 km; Urban development, 16 km, NLOS; Mixed stress test, 20 km, LOS+NLOS+TUNNEL) and three thermal/computational-headroom edge profiles (Table 1):

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Nominal	25	0,60	120	0,15
Degraded	45	1,40	90	0,30
Overload	50	1,80	60	0,45

Table 1 shows that the profiles differ not only in ambient temperature: the Overload profile combines the highest ambient temperature (50 °C), the largest thermal resistance (1.80), and the largest thermal performance-degrading coefficient (0.45) with the lowest maximum throughput (60 Mbit/s) – i.e., it has the smallest thermal headroom of all three profiles. The Nominal profile, by contrast, combines the lowest ambient temperature (25 °C) with the highest throughput (120 Mbit/s). It is precisely this difference that determines why, under identical load, the Overload profile systematically leads to thermal throttling of the Edge node, whereas the Degraded profile does not (details in Sections 5.3-5.4).

The factorial design combines three baseline scenarios (Nominal, without Anomaly Burst) and three aggravated ones (Overload/Degraded, with Anomaly Burst) – six scenarios, each executed under **two architecture modes** (16) with $N_{run} = 5$ replications, i.e., $6 \times 2 \times 5 = 60$ independent runs.

4.10. Software Implementation

The model is implemented as the train_digital_twin Python package (modular structure: traffic.py, channel.py, edge_node.py, cloud_node.py, queueing.py, simulator.py), verified by 29 automated tests (pytest) covering the correctness of the priority packet queue, the channel model (tunnel/handover/BLER), traffic savings, and integration scenarios. The simulation is discrete-time (Euler method, $\Delta t = 0,01$ s), with no

external DES frameworks. The results of the full factorial design (60 runs) are exported as an Excel report with native charts and formulas that reference the safety thresholds (18) – this report is the source of the figures in Section 5.

Code availability. The complete simulator source code, test suite, and factorial-design reproduction script are published in an open repository:

<https://github.com/nikolaykusch/tdt>

Results

The results were obtained by executing the full factorial design (Section 4.9) under two architecture modes (16): 6 scenarios $\times$ 2 modes $\times$ $N_{run} = 5$ replications = 60 independent runs, 2 374 920 simulation ticks in total. All figures in this section are native charts built directly from the resulting factorial-design data; dashed lines denote the safety thresholds (18). Tables 2-5 present the complete set of numerical results for all six scenarios, so that this section is self-contained and does not require reference to the simulator's source files.

5.1. Distribution of System States and Overall PLR

Fig. 1 summarizes the distribution of time the system spends in each of the four operating states (18) for the six factorial-design scenarios under the realistic HYBRID_FILTERED mode.

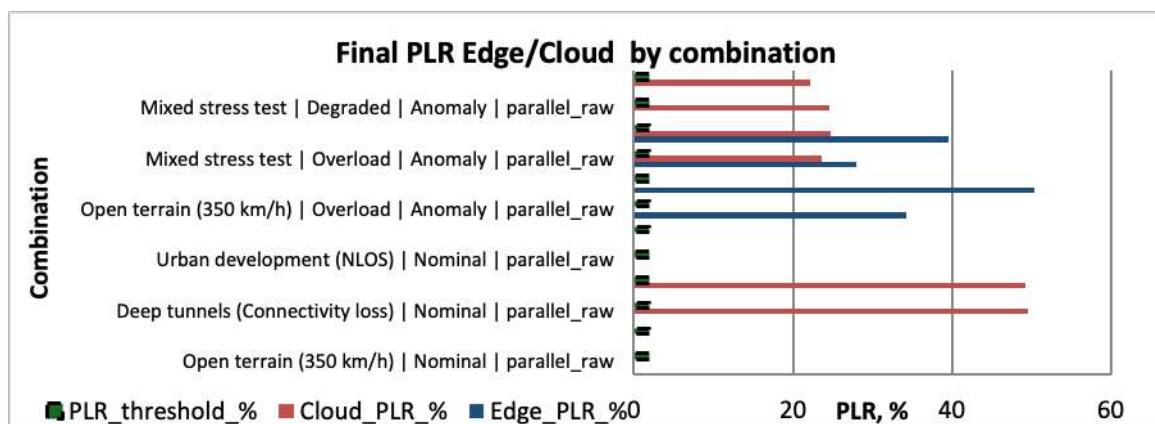


Fig. 1. Share of time the system spends in the Both OK / Cloud Down / Edge Down / Both Down states across the six factorial-design scenarios (HYBRID_FILTERED mode)

The dominant system state changes depending on which bottleneck is active (exact values in Table 4): Both OK - 99,8 % of the time in open terrain under

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

nominal conditions, $99,7\%$ in urban development; *Cloud Down* - $82,2\%$ in the tunnel scenario; *Edge Down* - $87,9\%$ in open terrain under the Overload profile with Anomaly Burst enabled; *Both Down* - $74,7\%$ in the mixed stress test under the Overload profile. Fig. 2

supplements this with the final cumulative PLR of both subsystems across all 12 combinations (both architecture modes), with the safety-threshold line $PLR_{safety} = 2\%$ (18).

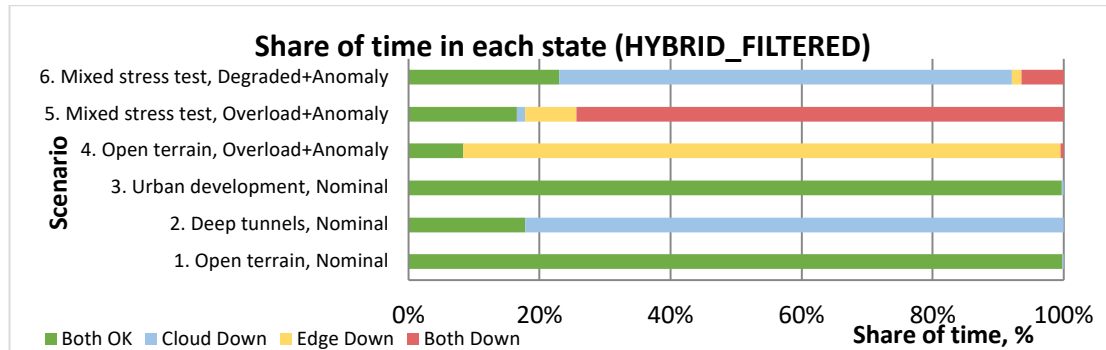


Fig. 2. Final cumulative Packet Loss Ratio of the Edge and Cloud subsystems across the 12 factorial-design combinations (6 scenarios $\times$ 2 architecture modes), with a dashed line marking the 2 % safety threshold

Neither subsystem exceeds the PLR_{safety} threshold in the nominal scenarios (1-3); Cloud exceeds the threshold in scenarios with channel degradation (tunnels, mixed stress test), while Edge exceeds it in scenarios with thermal degradation (Overload with Anomaly Burst); moreover, in HYBRID_FILTERED mode the peak Edge_PLR is systematically higher than in PARALLEL_RAW (details in Section 5.3).

Figs. 3-6 combine all six factorial-design scenarios on shared axes for each of the four key indicators: a solid line denotes Edge, a dashed line denotes Cloud (except for the thermal dynamics, where there is no Cloud component), color corresponds to the scenario, and the black dashed line marks the safety threshold (18). Each scenario's line stops where its route ends.

5.2. Combined Dynamics of Key Indicators Along the Route

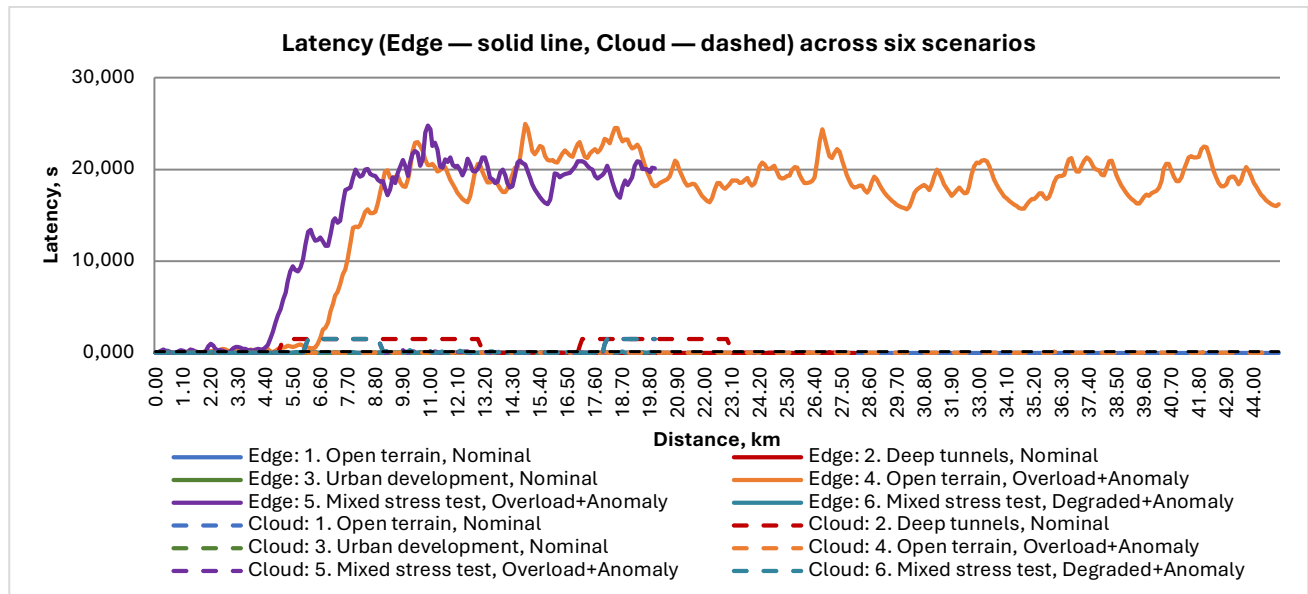


Fig. 3. Edge (solid line) and Cloud (dashed) latency along the distance for all six factorial-design scenarios

In Fig. 3, scenarios 1-3 (Nominal, without Anomaly Burst) show practically zero Edge latency along the entire route; the Cloud latency of scenario 2 (“Deep tunnels”) jumps to the $TTL = 1,5$ s deadline every time a

tunnel segment (8 and 6 km) is traversed, whereas scenarios 1 and 3 keep Cloud latency close to zero. Scenarios 4-5 (Overload, Anomaly Burst) show the opposite pattern: Edge latency rises to 15-20 s within the

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

first few kilometers of the route and remains at that level, while the Cloud latency of the same scenarios stays close to zero (scenario 4, LOS channel) or is moderately elevated (scenario 5, mixed channel). Scenario 6 (Degraded, Anomaly Burst) is the only stress scenario in

which Edge latency remains low (the thermal headroom of the Degraded profile is sufficient), and only the Cloud component degrades, in sync with scenario 5, since both traverse the same route.

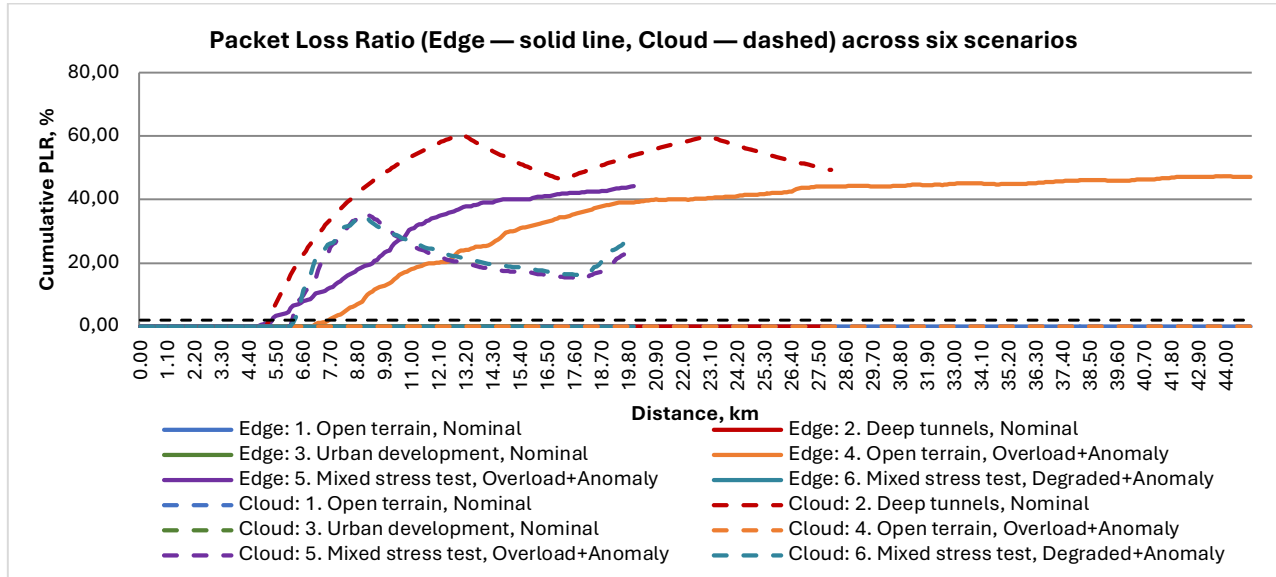


Fig. 4. Edge (solid line) and Cloud (dashed) Packet Loss Ratio along the distance for all six scenarios

Fig. 4 shows the cumulative nature of PLR: the curves only increase along the distance. Edge_PLR is noticeably non-zero only for scenarios 4 and 5 (Overload), reaching 40-50 %; for scenario 6 (Degraded), Edge_PLR remains at zero despite the same load level – a

direct consequence of the difference in thermal profiles (Section 5.3). Cloud_PLR increases stepwise on the tunnel and NLOS segments of scenarios 2, 5, and 6, remaining zero for scenarios 1, 3, and 4 (purely LOS routes or short nominal stretches).

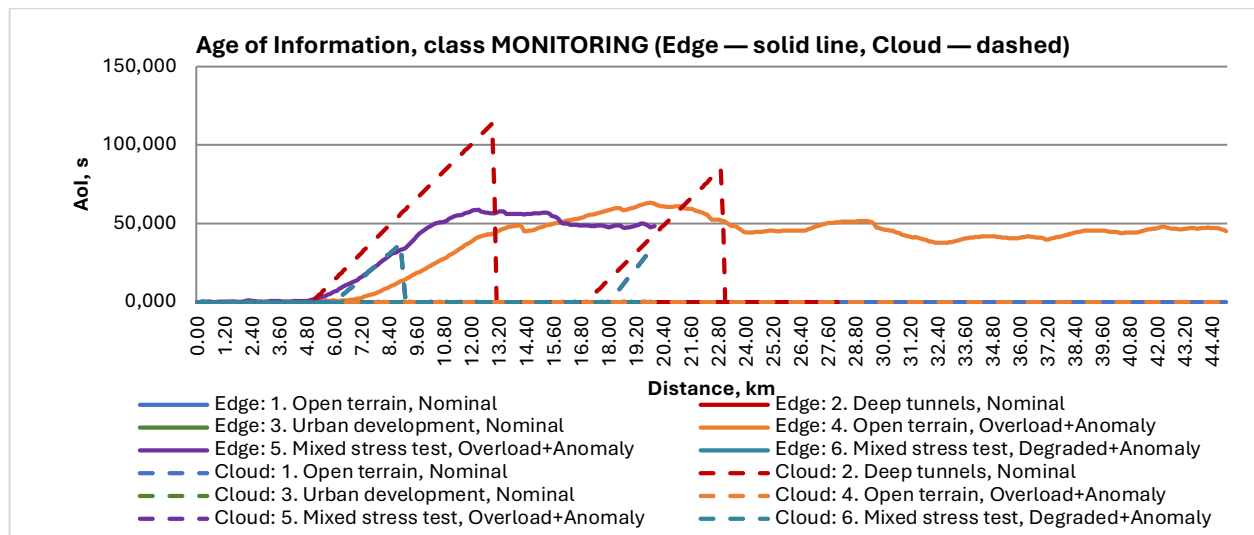


Fig. 5. Age of Information of the MONITORING class for Edge (solid line) and Cloud (dashed) along the distance for all six scenarios

Fig. 5 illustrates video-stream AoI. In scenario 2, $AoI_{cloud}^{monitoring}$ increases linearly during every tunnel traversal (the slope of the line corresponds to the rate at which data become stale when no packet is delivered) and resets to zero immediately after exiting the tunnel; the

maximum practically coincides with the traversal time of the longer (8-km) tunnel at 250 km/h. In scenarios 4-5, by contrast, $AoI_{edge}^{monitoring}$ increases – a mirror effect of the same nature, but caused by thermal throttling of the Edge queue rather than the absence of a channel.

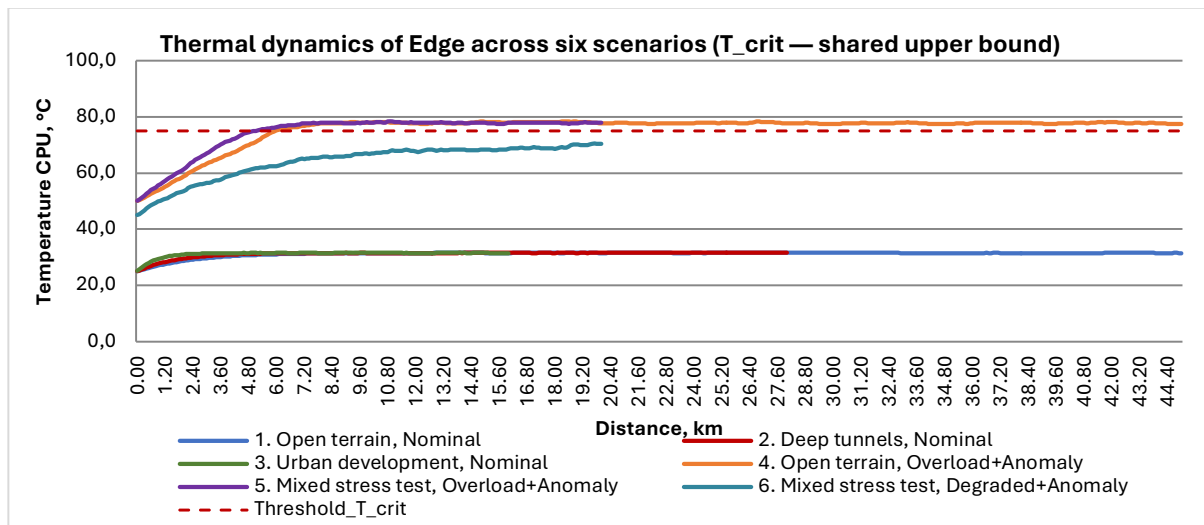


Fig. 6. Edge thermal dynamics for all six scenarios, with T_{crit} as a common upper bound

Fig. 6 directly compares the thermal profile across all six scenarios: scenarios 1-3 (Nominal) plateau at $\approx 32^\circ\text{C}$, substantially below T_{crit} ; scenarios 4-5 (Overload) cross $T_{crit} = 75^\circ\text{C}$ within the first few kilometers and stabilize at a plateau of $\approx 79^\circ\text{C}$; scenario 6 (Degraded, the same route and load as scenario 5) plateaus at $\approx 74^\circ\text{C}$ – below T_{crit} , so throttling (11) is practically never triggered. This difference precisely explains the divergence between the Latency and PLR curves of scenarios 5 and 6 in Figs. 3-4 under an identical input load.

5.3. Effect of Architecture Mode on Thermally Induced Degradation of the Edge Subsystem

A comparison of the PARALLEL_RAW and HYBRID_FILTERED modes on scenario 4 (open terrain, Overload profile, Anomaly Burst) quantitatively illustrates the cost of local ML filtering (Table 2). In PARALLEL_RAW mode, the average Edge latency is 11.66 s (maximum 27.12 s), $Edge_PLR = 32.8\%$, peak temperature 78.53°C ; in HYBRID_FILTERED mode, the average latency rises to 16.08 s (maximum 41.57 s), $Edge_PLR = 47.1\%$, peak temperature 79.48°C . The difference is explained by the additional CPU utilization $\Delta U_{ML} = 0.10$ (11) from the local ML inference used for filtering, which is active only in HYBRID_FILTERED mode: the hybrid architecture, advantageous in terms of traffic (Section 5.5), carries a measurable computational cost that systematically erodes the Edge node's thermal headroom precisely when it is already close to the limit.

5.4. Non-Additivity of Failures in the Combined Stress Test

On the “Mixed stress test” route (LOS, NLOS, TUNNEL segments) under the **Overload** profile, the simultaneous action of thermal throttling and channel degradation produces a share of the critical state of *Both Down* 74.7% (Fig. 1, Table 4), $Edge_PLR = 44.2\%$, $Cloud_PLR = 24.7\%$ (HYBRID_FILTERED). If the subsystem failures were statistically independent, with the probabilities observed in the isolated scenarios 2 and 4 ($P(\text{Cloud not OK}) \approx 0.822$, $P(\text{Edge not OK}) \approx 0.885$), the expected share of simultaneous failure would be ≈ 0.728 – a value close to the actually observed 0.747 . By contrast, under the **Degraded** profile, on the same route and with the same Anomaly Burst, the maximum CPU temperature is 73.91°C (HYBRID_FILTERED) – below T_{crit} , i.e., the thermal-throttling mechanism (11) is practically never triggered: $Edge_PLR \approx 0\%$, and the share of *Both Down* drops to 6.2% – more than 12 times lower than under the Overload profile, with the route, channel, and anomaly-mode parameters unchanged. This quantitatively confirms that, under mixed channel conditions, it is the thermal headroom of the Edge node's hardware platform, rather than the radio-channel characteristics, that determines whether the system enters a catastrophic state.

5.5. Traffic Savings from Hybrid Filtering

Figs. 7 and 8 show the volume of data queued for the Cloud and the savings share calculated per (17): HYBRID_FILTERED mode versus the PARALLEL_RAW baseline.

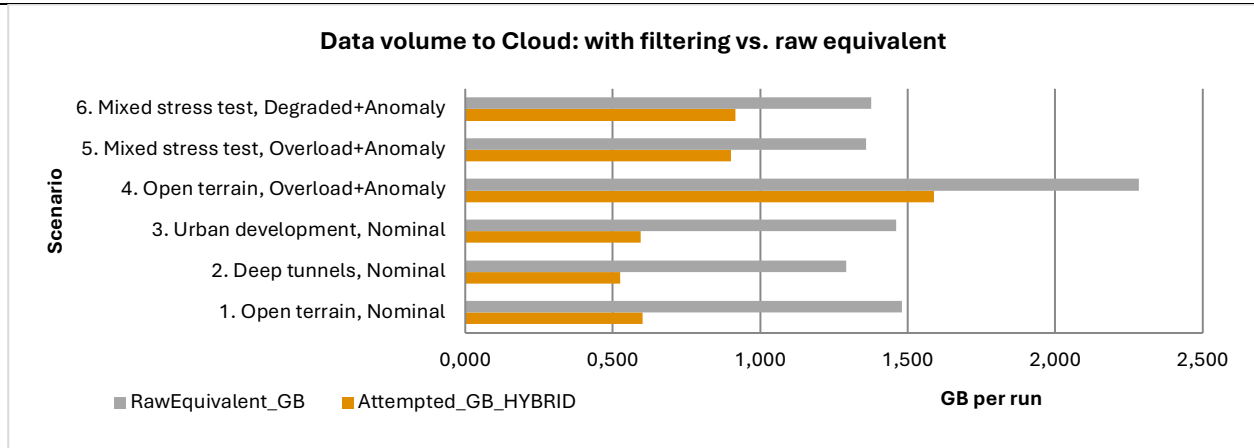


Fig. 7. Data volume queued to the Cloud per run: HYBRID_FILTERED (Attempted) versus the raw equivalent of PARALLEL_RAW (RawEquivalent), GB, across the six scenarios

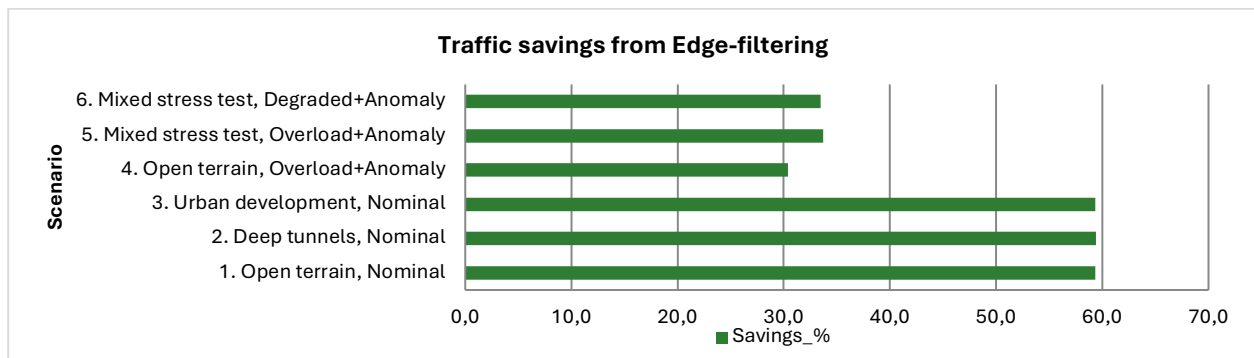


Fig. 8. Network-traffic savings from Edge filtering across the six factorial-design scenarios

Under nominal conditions (scenarios 1-3, without Anomaly Burst), the savings stably amount to **59,3 – 59,5 %**: constant video compression (16) with a factor of $\rho_c = 0,05$ while the SAFETY class is still forwarded in full. Under an active Anomaly Burst (scenarios 4-6), the savings drop to **30,9 – 33,8 %**, since during the anomaly the HYBRID_FILTERED mode (16) temporarily reverts to forwarding the full raw video stream for dispatcher verification, which partly offsets the filtering effect without eliminating it entirely, even given the observed anomaly-activity share of **15 – 21 %** of the time. The absolute volumes in Fig. 7 confirm the same effect in gigabytes: for scenario 1 (open terrain, Nominal), the volume of data queued to the Cloud drops from 1.479 GB (RawEquivalent) to 0.602 GB (Attempted) per run, and for scenario 4 (Overload+Anomaly) – from 2.282 GB to 1.516 GB (Table 5).

Table 2

Edge-subsystem indicators across the six scenarios, PARALLEL_RAW / HYBRID_FILTERED modes

Scenario	Mode	$\bar{L}_{edge}$, s	L_{edge}^{max} , s	Edge_PLR, %	T_{cpu}^{max}
----------	------	----------------------	----------------------	-------------	-----------------

5.6. Compute Energy Consumption Compared with Radio Transmission

Table 5 compares the physical energy (13) spent on Edge-node computation with the energy used by the radio transmitter to attempt data transfer to the Cloud (HYBRID_FILTERED). Across all six scenarios, the Edge node's compute energy (**1,85 – 2,89 W·h** per run) exceeds the radio-transmitter energy (**0,11 – 0,26 W·h**) by an order of magnitude: Edge accounts for **89 – 94 %** of the system's total energy consumption. The effect is amplified in the thermally loaded scenarios 4-5, where throttling extends the effective CPU active-work time per unit of usefully processed data.

5.7. Summary Result Tables

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

					°C
1. Open terrain, Nominal	PARALLEL_RAW	0,000	0,000	0,0	29,72
1. Open terrain, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,000	0,000	0,0	31,84
2. Deep tunnels, Nominal	PARALLEL_RAW	0,000	0,000	0,0	29,68
2. Deep tunnels, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,000	0,000	0,0	31,85
3. Urban development, Nominal	PARALLEL_RAW	0,000	0,000	0,0	29,70
3. Urban development, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,000	0,000	0,0	31,94
4. Open terrain, Overload+Anomaly	PARALLEL_RAW	11,655	27,124	32,8	78,53
4. Open terrain, Overload+Anomaly	HYBRID_FILTERED	16,082	41,574	47,1	79,48
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	PARALLEL_RAW	10,078	28,207	28,5	79,05
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	HYBRID_FILTERED	14,978	39,206	44,2	79,19
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	PARALLEL_RAW	0,027	1,014	0,0	71,20
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	HYBRID_FILTERED	0,030	1,057	0,0	73,91

Table 3

Cloud-subsystem indicators across the six scenarios, PARALLEL_RAW / HYBRID_FILTERED modes

Scenario	Mode	$\bar{L}_{cloud}$, s	Cloud_PLR, %
1. Open terrain, Nominal	PARALLEL_RAW	0,023	0,0
1. Open terrain, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,023	0,0
2. Deep tunnels, Nominal	PARALLEL_RAW	0,772	49,5
2. Deep tunnels, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,772	49,3
3. Urban development, Nominal	PARALLEL_RAW	0,025	0,0
3. Urban development, Nominal	HYBRID_FILTERED	0,025	0,0
4. Open terrain, Overload+Anomaly	PARALLEL_RAW	0,027	0,0
4. Open terrain, Overload+Anomaly	HYBRID_FILTERED	0,027	0,0
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	PARALLEL_RAW	0,441	26,4
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	HYBRID_FILTERED	0,441	24,7
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	PARALLEL_RAW	0,429	27,1
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	HYBRID_FILTERED	0,429	28,5

Table 3 confirms a mirror image of Table 2: the Cloud-segment latency remains low (0.02-0.44 s) under any Edge thermal profile, and the architecture mode (PARALLEL_RAW/HYBRID_FILTERED) has practically no effect on it – unlike Edge latency, which rises sharply under thermal throttling. The only factor that raises Cloud_PLR is radio-channel degradation: 49.3-

49.5 % in the tunnel scenario versus 0 % in open terrain and in the city, and these values likewise do not depend on the architecture mode, since both modes forward the SAFETY class in full. This confirms the conclusion of Section 6.1 that the Cloud bottleneck is external (the channel) rather than internal (compute), as it is for Edge.

Table 4

Share of time the system spends in each of the four states (18), %, HYBRID_FILTERED mode

Scenario	Both OK	Cloud Down	Edge Down	Both Down
1. Open terrain, Nominal	99,82	0,18	0,00	0,00
2. Deep tunnels, Nominal	17,83	82,17	0,00	0,00
3. Urban development, Nominal	99,71	0,29	0,00	0,00
4. Open terrain, Overload+Anomaly	11,46	0,02	87,91	0,61
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	15,84	0,93	8,51	74,72
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	22,68	69,44	1,71	6,17

Table 5

Scenario	Attempted, GB	RawEquivalent, GB	Savings, %	Edge, W·h	Cloud TX, W·h	Edge share, %
1. Open terrain, Nominal	0,602	1,479	59,33	2,116	0,257	89,17
2. Deep tunnels, Nominal	0,371	0,915	59,45	1,847	0,112	94,29
3. Urban development, Nominal	0,213	0,524	59,32	2,089	0,253	89,19
4. Open terrain, Overload+Anomaly	1,516	2,282	33,56	2,889	0,257	91,83
5. Mixed stress test, Overload+Anomaly	0,671	0,971	30,93	1,921	0,122	94,03
6. Mixed stress test, Degraded+Anomaly	0,644	0,972	33,80	1,912	0,122	94,00

Discussion of Results

6.1. The Mirror-Image, Not Universal, Nature of Edge and Cloud Advantages

The results of Section 5 refute the simplified view of Edge computing as an unconditionally “faster” alternative to Cloud. A direct comparison of Sections 5.2 and 5.3 demonstrates a mirror-image symmetry of failures: in the tunnel scenario, Edge remains flawless ($Edge_PLR = 0\%$), while Cloud degrades catastrophically ($Cloud_PLR \approx 49\%$) due to the physical absence of a communication channel; in the thermal-overload scenario, the situation reverses – Cloud remains flawless, while Edge degrades ($Edge_PLR$ to 47%) due to nonlinear thermal throttling (11). The nature of the bottleneck is fundamentally different for each architecture: for Cloud it is an external, physically uncontrollable factor (radio-channel availability along the route), while for Edge it is an internal, hardware-determined factor (the thermal capacity and cooling power of the on-board computer). This has direct engineering implications: channel degradation cannot be eliminated by software means (its consequences can only be mitigated through buffering or proactive compression), whereas Edge degradation can be designed out entirely through an adequate thermal-power margin – which is directly confirmed by the contrast between the Overload and Degraded profiles (Section 5.4): under identical load, changing only the thermal headroom reduces the share of the critical state *Both Down* by more than a factor of 12.

The speed of Edge’s response (latency close to zero under nominal load) is physically due to the absence of an intermediate radio channel and server segment (15) in the processing chain: data are processed where they are generated. Cloud’s advantage, by contrast, lies not in speed but in the scalability of long-term analysis – the server segment (15), with a throughput of $\mu_{srv} = 500$

Mbit/s, introduced in the model as a multi-tenant resource, is able to accumulate and process historical data from many trains simultaneously, something a computationally and energy-constrained on-board node fundamentally cannot provide (Section 6.3).

6.2. The “Distributed Infrastructure versus Traffic Volume” Trade-off

The hybrid architecture (16) delivers a measurable reduction in network traffic ($59,3 - 59,5\%$ under nominal conditions, Section 5.5), which directly reduces the load on the radio channel and the network operator’s potential data-transmission costs. However, this saving is not free: local filtering requires running ML inference directly on board, which measurably raises CPU utilization ($4U_{ML} = 0,10$, equation (11)) and, as a consequence, the peak temperature and frequency of thermal throttling (Section 5.3). In scenario 4, this manifests quantitatively: the average Edge latency rises from $11,66$ s (PARALLEL_RAW) to $16,08$ s (HYBRID_FILTERED), and $Edge_PLR$ rises from $32,8\%$ to $47,1\%$. This is a classic engineering trade-off: the complexity (and energy cost, Section 6.3) of maintaining a distributed on-board computing infrastructure grows in proportion to the functionality delegated to it, and this cost must be weighed together with – not separately from – the choice of Edge-node hardware profile and the decision to deploy hybrid filtering.

6.3. The Paradox of Higher Energy Cost for Computation Compared with Radio Transmission

The result of Section 5.6 – that $89 - 94\%$ of the system’s total energy consumption is attributable to local Edge computation rather than to radio transmission – contradicts the common intuition that “data transmission is energy-expensive, so it is better to

compute locally.” Within the model adopted here, the opposite holds: computation is an order of magnitude more energy-costly than transmitting the same volume of data. This does not mean that Edge computation is architecturally disadvantageous – it remains necessary for latency and resilience to connectivity loss (Section 6.1) – but it does mean that the argument “Edge saves energy” is not supported by the present model and should not be used as a standalone justification for a hybrid architecture; the correct justification is precisely the traffic savings (Section 5.5) and resilience to channel degradation (Section 5.2), not energy efficiency.

6.4. Recommendation for a Redundant Hybrid Architecture

The absence of additivity in failures (Section 5.4: the observed share *Both Down* $\approx 0,747$) is close to the product of the isolated failure probabilities $0,822 \times 0,885 \approx 0,728$ rather than to their sum) means that, for end-to-end system reliability, simultaneous independent degradation is the worst-case scenario, whose probability grows multiplicatively. This leads directly to a practical conclusion: the monitoring system should treat Edge and Cloud as **parallel, mutually redundant channels** for delivering critical information, rather than as a sequential “primary-backup” pair. In practice, this means:

- SAFETY-class alerts (1) must be processed locally on Edge regardless of the state of the communication channel – this is the only way to guarantee a response while traversing tunnels (Section 5.2), when Cloud_PLR exceeds the safety threshold by more than a factor of 24;
- the Edge node must have a mechanism for proactively shedding load (temporarily reducing the video sampling rate, or a priority switch to a “SAFETY-only” mode) as T_{cpu} approaches T_{crit} , since once the threshold is crossed, degradation becomes self-reinforcing (11): rising latency means a growing queue backlog, which sustains high utilization and temperature above T_{crit} ;
- the choice of the Edge node’s hardware thermal profile is a design decision at least as important as the data-processing algorithmic strategy (Section 5.4), and must account for the additional load from hybrid-filtering ML inference (Section 6.2), not merely the baseline monitoring traffic.

6.5. Impact on the Railway’s Server Infrastructure

Introducing the Cloud server segment (15) with a finite throughput μ_{srv} into the model reflects a real-world constraint: the monitoring system’s backend serves not a single train but an entire fleet simultaneously. The traffic savings from hybrid filtering (Section 5.5) directly reduce the load on this shared resource – scaled to a fleet of N trains, a proportional reduction of the input flow by a factor of $1 - \text{savings}$ makes it possible either to serve a larger fleet with the same backend or to relax its

throughput requirements. At the same time, since the cloud segment remains necessary for long-term trend analysis and retraining of predictive-maintenance models (unlike Edge, which is limited by compute power and buffer capacity), the hybrid model does not eliminate dependence on the server infrastructure but redistributes its load in favor of compressed, pre-filtered aggregated telemetry, reserving the full raw stream only for the verification of confirmed anomalies.

6.6. Study Limitations

The factorial design is a targeted, not an exhaustive, factorial sample (six of the nine {route} $\times$ {profile} combinations were examined); the model considers a single train in isolation, without inter-train interference under dense traffic; the thermal model is single-reservoir (lumped RC); the stochastic components (2)-(10) were chosen based on qualitative assumptions about a plausible range of variability rather than a calibrated dataset of real rolling-stock telemetry, so the absolute values should be regarded as comparative (for contrasting architectures under identical conditions) rather than as a precise forecast of the performance of a specific production system.

Conclusion

This paper builds and verifies a discrete-time digital twin of a train that makes it possible to quantitatively compare Edge- and Cloud-oriented processing of HSR rolling-stock monitoring data within a single, consistent set of stochastic conditions (radio channel, thermal regime, event-driven load). In contrast to qualitative claims about the merits of each architecture, concrete quantitative estimates were obtained: Edge delivers near-zero latency and complete independence from the radio channel (in the tunnel scenario, $\text{Cloud_PLR} \approx 49\%$ versus $\text{Edge_PLR} = 0\%$), whereas Cloud is independent of the on-board computer’s thermal state (in the thermal-overload scenario, Edge_PLR to 47% versus $\text{Cloud_PLR} = 0\%$). The simultaneous action of both degradation factors produces a share of the critical state of *Both Down* to $74,7\%$, whereas increasing the thermal headroom of the hardware platform alone is sufficient to reduce this share by more than a factor of 12 – this quantitatively confirms the hypothesis that the reliability of the monitoring system is determined not by choosing a single “better” architecture, but by the redundant interaction of both.

The empirically evaluated hybrid architecture, in which Edge pre-filters monitoring traffic, delivers network-traffic savings of $59,3 - 59,5\%$ under nominal conditions and $30,9 - 33,8\%$ under active anomalous load, confirming the initial hypothesis regarding the feasibility of hybrid computing for this class of systems. At the same time, two quantitative trade-offs were identified that require explicit consideration in system

design: (1) the computational load of local ML inference measurably degrades the Edge node's thermal headroom (peak temperature rises from $78,5$ to $79,5^{\circ}\text{C}$, and average latency from $11,66$ to $16,08$ s in the most heavily loaded scenario); (2) local computation proved to be an order of magnitude more energy-costly than radio transmission of the same volume of data ($89 - 94\%$ of the system's total energy consumption), which refutes energy efficiency as a standalone argument in favor of Edge and leaves traffic savings and resilience to connectivity loss as the only valid justification for the hybrid approach.

Future research should aim to extend the factorial design to a full enumeration of {route} $\times$ {profile} $\times$ {anomaly} combinations for rigorous variance decomposition of each factor's contribution; to validate the radio-channel and thermal-model parameters against real telemetry from operating rolling stock; to apply Federated Learning for distributed training of predictive-maintenance models without transmitting private raw train data to the Cloud, which naturally aligns with the conclusion that the system's dependence on constant availability of an external communication channel must be minimized; and to develop V2V (Train-to-Train) communications as a third, fully decentralized redundancy channel capable of detecting and propagating critical events even when both the Cloud and the nearest train's own Edge node are simultaneously unavailable.

Список використаних джерел

1. Railnova. (n.d.). *How edge computing revolutionises railway operations*. <https://www.railnova.eu/how-edge-computing-revolutionises-railway-operations/>
2. ICOS Project. (n.d.). *Cloud-edge-IoT solutions: Present and future for railway sector*. <https://www.icos-project.eu/blog/cei-in-railway-sector/>
3. He, R., Ai, B., Wang, G., Guan, K., Zhong, Z., Molisch, A. F., Briso-Rodríguez, C., & Oestges, C. (2016). High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(3), 49–58. <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2564446>
4. Tata Consultancy Services (TCS). (n.d.). *IoT-based predictive maintenance for smart railroad asset management* [White paper]. <https://www.tcs.com/content/dam/global-tcs/en/pdfs/insights/whitepapers/Transforming-Railroad-Asset-Management.pdf>
5. Gbadamosi, A. Q., Oyedele, L. O., Delgado, J. M. D., Kusimo, H., Akanbi, L., Olawale, O., & Muhammed-Yakubu, N. (2021). IoT for predictive assets monitoring and maintenance: An implementation strategy for the UK rail industry. *Automation in Construction*, 122, 103486. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103486>
6. IoT For All. (n.d.). *How the railroad industry is leveraging IoT edge computing*. <https://www.iotforall.com/how-the-rail-sector-is-leveraging-iot-edge-computing>
7. Kostrzewski, M., & Melnik, R. (2021). Condition monitoring of rail transport systems: A bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*, 21(14), 4710. <https://doi.org/10.3390/s21144710>
8. Davari, N., Veloso, B., de Assis Costa, G., Mota Pereira, P., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. *Sensors*, 21(17), 5739. <https://doi.org/10.3390/s21175739>
9. Pappaterra, M. J., Flammini, F., Vittorini, V., & Bešinović, N. (2021). A systematic review of artificial intelligence public datasets for railway applications. *Infrastructures*, 6(10), 136. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100136>
10. Zhang, D., Peng, Y., Xu, Y., Du, C., Zhang, Y., Wang, N., Chong, Y., Wang, H., Wu, D., Liu, J., Zhang, H., Lu, L., & Liu, J. (2022). A high-speed railway network dataset from train operation records and weather data. *Scientific Data*, 9(1), 244. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01349-8>
11. Zhou, X., Ke, R., Yang, H., & Liu, C. (2021). When intelligent transportation systems sensing meets edge computing: Vision and challenges. *Applied Sciences*, 11(20), 9680. <https://doi.org/10.3390/app11209680>
12. Resende, C., Folgado, D., Oliveira, J., Pinto, F., Santos, M. Y., & Costa, C. (2021). TIP4.0: Industrial Internet of Things platform for predictive maintenance. *Sensors*, 21(14), 4676. <https://doi.org/10.3390/s21144676>
13. Armijo, A., & Zamora-Sánchez, D. (2024). Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a digital twin: A case study. *Sensors*, 24(7), 2115. <https://doi.org/10.3390/s24072115>
14. Atanasov, I., Pencheva, E., Trifonov, V., & Kassev, K. (2024). Railway cloud: Management and orchestration functionality designed as microservices. *Applied Sciences*, 14(6), 2368. <https://doi.org/10.3390/app14062368>
15. He, R., Ai, B., Zhong, Z., Yang, M., Chen, R., Ding, J., Ma, Z., Sun, G., & Liu, C. (2022). 5G for railways: The next generation railway dedicated communications. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.03127>
16. He, R., Ai, B., Zhong, Z., Yang, M., Huang, C., Chen, R., Ding, J., Mi, H., Ma, Z., Sun, G., & Liu, C. (2023). Radio communication scenarios in 5G-railways. *China Communications*, 20(9), 235–246. <https://doi.org/10.23919/JCC.2023.0000xx>
17. Wang, C., Ji, W., Zheng, G., & Saleem, A. (2021). Analysis of propagation characteristics for various subway tunnel scenarios at 28 GHz. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 7666624. <https://doi.org/10.1155/2021/7666624>
18. Clérigo, A., Schrapel, M., Rito, P., Sargento, S., & Vinel, A. (2025). Microservice-based

architecture for enhancing road safety with support for low-latency services. *Proceedings of the 2025 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2025)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/NOMS57970.2025.11073709>

19. Xu, J., Wei, Z., Lyu, Z., Shi, L., & Han, J. (2021). Throughput maximization of offloading tasks in multi-access edge computing networks for high-speed railways. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(9), 9525–9539. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3101571>

20. Atik, D., Gursu, M., Mehmeti, F., & Kellerer, W. (2024). Rural handover parameter tuning to achieve end to end latency requirements of future railway mobile communication systems. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.06957>

21. Arthurs, P., Gillam, L., Krause, P., Wang, N., Halder, K., & Mouzakitis, A. (2022). A taxonomy and survey of edge cloud computing for intelligent transportation systems and connected vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6206–6221. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3084396>

22. Khan, A., Khattak, K. S., Gul, H., Alqahtani, H. S., Alqahtani, A. S., & Gumaei, A. (2023). Edge computing for effective and efficient traffic characterization. *Sensors*, 23(23), 9385. <https://doi.org/10.3390/s23239385>

23. Abdullah, M. F. A., Yogarayan, S., Abdul Razak, S. F., Azman, A., Muhamad Amin, A. H., & Salleh, M. (2021). Edge computing for vehicle to everything: A short review. *F1000Research*, 10, 1104. <https://doi.org/10.12688/f1000research.73269.4>

24. Vermesan, O., John, R., Pype, P., Daalderop, G., Kriegel, K., Mitic, G., Lorentz, V. R. H., Bahr, R., Sand, H.-E., Bockrath, S., & Waldhör, S. (2021). Automotive intelligence embedded in electric connected autonomous and shared vehicles technology for sustainable green mobility. *Frontiers in Future Transportation*, 2, 688482. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2021.688482>

25. Zhang, K., Huang, W., Hou, X., Xu, J., Su, R., & Xu, H. (2021). A fault diagnosis and visualization method for high-speed train based on edge and cloud collaboration. *Applied Sciences*, 11(3), 1251. <https://doi.org/10.3390/app11031251>

26. Sun, P., Zhang, W., & Jia, Z. (2021). High-speed train intelligent maintenance pattern and edge-computing perception model. *Proceedings of the 2021 IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 19th International Conference on Smart City; IEEE 7th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys 2021)*, 1331–1337. <https://doi.org/10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys53884.2021.00201>

27. Asad, S. M., Tahir, A., Bin Rais, R. N., Ansari, S., Abubakar, A. I., Hussain, S., & Imran, M. A. (2021). Edge intelligence in private mobile networks for next-generation railway systems. *Frontiers in*

Communications and Networks, 2, 769299. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.769299>

28. Zhao, Y., Yu, X., Chen, M., Zhang, M., Chen, Y., Niu, X., Sha, X., Zhan, Z., & Li, W. (2021). Continuous monitoring of train parameters using IoT sensor and edge computing. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15458–15468. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3026643>

29. Wisultschew, C., Mujica, G., Lanza-Gutierrez, J. M., & Portilla, J. (2021). 3D-LIDAR based object detection and tracking on the edge of IoT for railway level crossing. *IEEE Access*, 9, 35718–35729. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062706>

30. Guo, Q., Xu, Z., Yuan, J., & Wei, Y. (2024). Computation offloading strategy for detection task in railway IoT with integrated sensing, storage, and computing. *Electronics*, 13(15), 2982. <https://doi.org/10.3390/electronics13152982>

31. Xu, J., Ai, B., Chen, L., Cui, Y., & Wang, N. (2022). Deep reinforcement learning for computation and communication resource allocation in multiaccess MEC assisted railway IoT networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(24), 23797–23808. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3205175>

32. Zhang, X. (2023). Optimization design of railway logistics center layout based on mobile cloud edge computing. *PeerJ Computer Science*, 9, e1298. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1298>

References

1. Railnova. (n.d.). *How edge computing revolutionises railway operations*. <https://www.railnova.eu/how-edge-computing-revolutionises-railway-operations/> [in English].
2. ICOS Project. (n.d.). *Cloud-edge-IoT solutions: Present and future for railway sector*. <https://www.icos-project.eu/blog/cei-in-railway-sector/> [in English].
3. He, R., Ai, B., Wang, G., Guan, K., Zhong, Z., Molisch, A. F., Briso-Rodríguez, C., & Oestges, C. (2016). High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(3), 49–58. <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2564446> [in English].
4. Tata Consultancy Services (TCS). (n.d.). *IoT-based predictive maintenance for smart railroad asset management* [White paper]. <https://www.tcs.com/content/dam/global-tcs/en/pdfs/insights/whitepapers/Transforming-Railroad-Asset-Management.pdf> [in English].
5. Gbadamosi, A. Q., Oyedele, L. O., Delgado, J. M. D., Kusimo, H., Akanbi, L., Olawale, O., & Muhammed-Yakubu, N. (2021). IoT for predictive assets monitoring and maintenance: An implementation strategy for the UK rail industry. *Automation in Construction*, 122, 103486. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103486> [in English].

6. IoT For All. (n.d.). *How the railroad industry is leveraging IoT edge computing*. <https://www.iotforall.com/how-the-rail-sector-is-leveraging-iot-edge-computing> [in English].
7. Kostrzewski, M., & Melnik, R. (2021). Condition monitoring of rail transport systems: A bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*, 21(14), 4710. <https://doi.org/10.3390/s21144710> [in English].
8. Davari, N., Veloso, B., de Assis Costa, G., Mota Pereira, P., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. *Sensors*, 21(17), 5739. <https://doi.org/10.3390/s21175739> [in English].
9. Pappaterra, M. J., Flammini, F., Vittorini, V., & Bešinović, N. (2021). A systematic review of artificial intelligence public datasets for railway applications. *Infrastructures*, 6(10), 136. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100136> [in English].
10. Zhang, D., Peng, Y., Xu, Y., Du, C., Zhang, Y., Wang, N., Chong, Y., Wang, H., Wu, D., Liu, J., Zhang, H., Lu, L., & Liu, J. (2022). A high-speed railway network dataset from train operation records and weather data. *Scientific Data*, 9(1), 244. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01349-8> [in English].
11. Zhou, X., Ke, R., Yang, H., & Liu, C. (2021). When intelligent transportation systems sensing meets edge computing: Vision and challenges. *Applied Sciences*, 11(20), 9680. <https://doi.org/10.3390/app11209680> [in English].
12. Resende, C., Folgado, D., Oliveira, J., Pinto, F., Santos, M. Y., & Costa, C. (2021). TIP4.0: Industrial Internet of Things platform for predictive maintenance. *Sensors*, 21(14), 4676. <https://doi.org/10.3390/s21144676> [in English].
13. Armijo, A., & Zamora-Sánchez, D. (2024). Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a digital twin: A case study. *Sensors*, 24(7), 2115. <https://doi.org/10.3390/s24072115> [in English].
14. Atanasov, I., Pencheva, E., Trifonov, V., & Kassev, K. (2024). Railway cloud: Management and orchestration functionality designed as microservices. *Applied Sciences*, 14(6), 2368. <https://doi.org/10.3390/app14062368> [in English].
15. He, R., Ai, B., Zhong, Z., Yang, M., Chen, R., Ding, J., Ma, Z., Sun, G., & Liu, C. (2022). 5G for railways: The next generation railway dedicated communications. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.03127> [in English].
16. He, R., Ai, B., Zhong, Z., Yang, M., Huang, C., Chen, R., Ding, J., Mi, H., Ma, Z., Sun, G., & Liu, C. (2023). Radio communication scenarios in 5G-railways. *China Communications*, 20(9), 235–246. <https://doi.org/10.23919/JCC.2023.0000xx> [in English].
17. Wang, C., Ji, W., Zheng, G., & Saleem, A. (2021). Analysis of propagation characteristics for various subway tunnel scenarios at 28 GHz. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 7666624. <https://doi.org/10.1155/2021/7666624> [in English].
18. Clérigo, A., Schrapel, M., Rito, P., Sargento, S., & Vinel, A. (2025). Microservice-based architecture for enhancing road safety with support for low-latency services. *Proceedings of the 2025 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2025)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/NOMS57970.2025.11073709> [in English].
19. Xu, J., Wei, Z., Lyu, Z., Shi, L., & Han, J. (2021). Throughput maximization of offloading tasks in multi-access edge computing networks for high-speed railways. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(9), 9525–9539. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3101571> [in English].
20. Atik, D., Gursu, M., Mehmeti, F., & Kellerer, W. (2024). Rural handover parameter tuning to achieve end to end latency requirements of future railway mobile communication systems. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.06957> [in English].
21. Arthurs, P., Gillam, L., Krause, P., Wang, N., Halder, K., & Mouzakitis, A. (2022). A taxonomy and survey of edge cloud computing for intelligent transportation systems and connected vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6206–6221. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3084396> [in English].
22. Khan, A., Khattak, K. S., Gul, H., Alqahtani, H. S., Alqahtani, A. S., & Gumaei, A. (2023). Edge computing for effective and efficient traffic characterization. *Sensors*, 23(23), 9385. <https://doi.org/10.3390/s23239385> [in English].
23. Abdullah, M. F. A., Yogarayan, S., Abdul Razak, S. F., Azman, A., Muhamad Amin, A. H., & Salleh, M. (2021). Edge computing for vehicle to everything: A short review. *F1000Research*, 10, 1104. <https://doi.org/10.12688/f1000research.73269.4> [in English].
24. Vermesan, O., John, R., Pype, P., Daalderop, G., Kriegel, K., Mitic, G., Lorentz, V. R. H., Bahr, R., Sand, H.-E., Bockrath, S., & Waldhör, S. (2021). Automotive intelligence embedded in electric connected autonomous and shared vehicles technology for sustainable green mobility. *Frontiers in Future Transportation*, 2, 688482. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2021.688482> [in English].
25. Zhang, K., Huang, W., Hou, X., Xu, J., Su, R., & Xu, H. (2021). A fault diagnosis and visualization method for high-speed train based on edge and cloud collaboration. *Applied Sciences*, 11(3), 1251. <https://doi.org/10.3390/app11031251> [in English].
26. Sun, P., Zhang, W., & Jia, Z. (2021). High-speed train intelligent maintenance pattern and edge-computing perception model. *Proceedings of the 2021 IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 19th International Conference on Smart City; IEEE 7th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys 2021)*, 1331–1337.

<https://doi.org/10.1109/HCCC-DSS-SmartCity-DependSys53884.2021.00201> [in English].

27. Asad, S. M., Tahir, A., Bin Rais, R. N., Ansari, S., Abubakar, A. I., Hussain, S., & Imran, M. A. (2021). Edge intelligence in private mobile networks for next-generation railway systems. *Frontiers in Communications and Networks*, 2, 769299. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.769299> [in English].

28. Zhao, Y., Yu, X., Chen, M., Zhang, M., Chen, Y., Niu, X., Sha, X., Zhan, Z., & Li, W. (2021). Continuous monitoring of train parameters using IoT sensor and edge computing. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15458–15468. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3026643> [in English].

29. Wisultschew, C., Mujica, G., Lanza-Gutierrez, J. M., & Portilla, J. (2021). 3D-LIDAR based object detection and tracking on the edge of IoT for railway level crossing. *IEEE Access*, 9, 35718–35729. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062706> [in English].

30. Guo, Q., Xu, Z., Yuan, J., & Wei, Y. (2024). Computation offloading strategy for detection task in railway IoT with integrated sensing, storage, and computing. *Electronics*, 13(15), 2982. <https://doi.org/10.3390/electronics13152982> [in English].

31. Xu, J., Ai, B., Chen, L., Cui, Y., & Wang, N. (2022). Deep reinforcement learning for computation and communication resource allocation in multiaccess MEC assisted railway IoT networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(24), 23797–23808. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3205175> [in English].

32. Zhang, X. (2023). Optimization design of railway logistics center layout based on mobile cloud edge computing. *PeerJ Computer Science*, 9, e1298. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1298> [in English].

Порівняльний аналіз архітектур периферійних і хмарних обчислень для систем моніторингу рухомого складу

Анотація

У статті наведено кількісне порівняння оброблення даних моніторингу технічного стану рухомого складу високошвидкісного залізничного транспорту (HSR), орієнтованого на Edge і Cloud, на основі верифікованого дискретно-часового цифрового двійника поїзда. На відміну від підходів, у яких Edge і Cloud розглянуто як окремі незалежні конфігурації, запропонована модель одночасно обчислює обидва конвеєри оброблення в межах одного запуску, включаючи стохастичний радіоканал (корельоване замирання, погіршення характеристик під впливом ефекту Доплера, HARQ із залишковою помилкою блока), пріоритетне планування двох класів трафіку (критичного для безпеки та моніторингового), а також теплову модель бортового комп'ютера з механізмом тротлінгу. Додатково реалізовано та експериментально оцінено гібридний режим

архітектури, у якому Edge попередньо фільтрує моніторинговий трафік перед його передаванням до Cloud. Повний факторний план експерименту показує, що дві архітектури мають принципово різні механізми виникнення вузьких місць: Cloud деградує через фізичну недоступність радіоканалу, тоді як Edge деградує через тепловий тротлінг за недостатнього охолодження. Одночасна дія обох факторів зумовлює значну частку критичного стану *Both Down* від загального часу спостереження, тоді як лише збільшення теплового запасу апаратної платформи дає змогу зменшити цю частку в декілька разів. Гібридна фільтрація забезпечує вимірюване зменшення мережевого трафіку як за номінальних умов, так і за активного аномального навантаження, проте супутнє обчислювальне навантаження ML-інференсу помітно зменшує тепловий запас вузла Edge. Локальні обчислення виявилися суттєво більш енерговитратними, ніж радіопередавання такого самого обсягу даних. Отримані результати кількісно обґрунтовують необхідність резервованої гібридної архітектури моніторингу, у якій жодна окрема підсистема не є єдиною точкою відмови.

Ключові слова: Edge computing, Cloud computing, цифровий двійник, моніторинг рухомого складу, IoT, прогнозне технічне обслуговування, Age of Information, QoS, залізничний транспорт.

Mykola KUSHCH, Master of Science. ORCID: 0009-0009-3078-4671.

Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: dev.kusch@gmail.com

Oleh ABBASOV, Master of Science. ORCID: 0009-0004-1299-5903.

Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: abbasov.oleg@gmail.com

Olena SHCHEBLYKINA, PhD, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-8304-2921.

Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: sov@kart.edu.ua

Maksym KANEVSKYI, Master of Science. ORCID: 0009-0007-6284-0311.

Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: kanevskij@gmail.com

Микола КУЩ, магістр. ORCID: 0009-0009-3078-4671.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: dev.kusch@gmail.com

Олег АББАСОВ, магістр. ORCID: 0009-0004-1299-5903.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: abbasov.oleg@gmail.com

Олена ЩЕБЛИКІНА, PhD, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів.

. ORCID: 0000-0002-8304-2921.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: sov@kart.edu.ua

Максим КАНЄВСЬКИЙ, магістр. ORCID: 0009-0007-6284-0311.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: kanevskij@gmail.com

Стаття надійшла 19.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

*Редакційн колегія журналу
«Інформаційно-керуючі системи
на залізничному транспорті» в
складі:*

Головний редактор: Панченко Сергій
Володимирович - доктор технічних наук,
професор Український державний
університет залізничного транспорту

Випусковий редактор – Щєбликіна Олена
Вікторівна, Український державний
університет залізничного транспорту

Члени редакційної колегії:

Мойсеєнко Валентин Іванович – доктор
технічних наук, професор Український
державний університет залізничного
транспорту

Трубочанінова Карина Артурівна –
доктор технічних наук, професор
Український державний університет
залізничного транспорту

Каргін Анатолій Олексійович – доктор
технічних наук, професор Український
державний університет залізничного
транспорту

Доценко Сергій Ілліч – доктор технічних
наук, професор Український державний
університет залізничного транспорту

Дегтярьов Олександр Валентинович –
кандидат технічних наук, доцент,
Харківський національний університет
радіоелектроніки

Самсонкін Валерій Миколайович –
доктор технічних наук, професор
Національний транспортний університет

Заболотний Олександр Віталійович –
доктор технічних наук, професор, декан
факультету інтелектуальних систем
управління, Національний
аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»,
Україна

Павел Снятала – професор Познанського
технологічного університету, Інститут
інформатики, Познань, Польща

Руцький Мирослав – професор
Радомського університету імені
Казимира Пуласкі (Радом, Польща).

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

*Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06148, за
рішенням № 947 Національної ради України з питань
телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від
01 травня 2025 р.*

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

*Журнал включено до Переліку наукових фахових видань
України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і
науки України № 928 від 11 червня 2026 р.)*

*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>).*

*Друкується за рішенням Вченої ради університету,
протокол № 13 від 28 вересня 2026 р.*

*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,
площа Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 318.
Тел.: (057) 730-19-37, 730-10-82. E-mail: . ikst.ukrsurt@ukr.net*

Редактор Ібрагімова Н. В.

*Підписано до друку 28.09.2026р. Протокол №13 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, площа Фейєрбаха, 7.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.