



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

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

№2 2025 р.

2 (161)' 2025

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



КАНЄВСЬКИЙ М.В., СЕМИКРАС А.І., ЗМІЙ
С.О., ЩЕБЛИКІНА О.В.

Акустична система моніторингу повітряного
простору: новий рівень виявлення безпілотних
літальних апаратів

..... 3

ОГАР О. М., КУЦЕНКО М. Ю., ГУРІН Д. О.,
КОНДРАТЬЄВ І. В., ЛЕВЧЕНКО А. О.

Розроблення методу розрахунку швидкості виходу
відцепів із паркової гальмової позиції
сортувального пристрою з гравітаційно-
прицільним їх гальмуванням

.....16

КИМАН А. М., ХАРЧЕНКО Д. Р., ПРОХОРЧЕНКО
Г.О., ХЛІБИШИН Б.Ю., АКОПЯН Е. Л.

Дослідження системи перевезень пасажирів
швидкісними і звичайними поїздами на основі
методів аналізу складних мереж

.....27

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

Згладжування часової послідовності оцінок
параметрів сигналу тестування обмотки статора
трифазного асинхронного двигуна

.....38

КУЩ М. Ю., АББАСОВ О. О. Розроблення розумного нічника із світло-звуковою модуляцією	45
ФІЛІМОНЧУК Т. В., КОПАЙЛО Я. Р., ПАРТИКА С. О., СЕВОСТЬЯНОВА О. М. Модель автоматизації збору даних із вебресурсів на основі генеративного штучного інтелекту	68
ШУЛЬДІНЕР Ю. В., ПЕТРИК С. В. Удосконалення функціонування ланцюгів доставлення вантажів на основі моделей мультимодальних перевезень	80
ЄЛІЗАРЕНКО А. О., ДЕЙНЕГА Т. С., ЄЛІЗАРЕНКО І. О. Організація поїзного радіозв'язку на ділянках зі швидкісним рухом пасажирських поїздів	86
ПУЗИР В. Г., ОБОЗНИЙ О. М., ЗАЛАТА А. С. Інтелектуальна система керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей та еволюційної оптимізації	93
ЛАРЧЕНКО Л. В., РОЖНОВА Т. Г., ЛАРЧЕНКО Б. Д., ПАХОМОВ Ю. В. Моделі проєктування online-обчислювача дробово-ірраціональних функцій із бітовим потоком даних	98
МІРОШНИК М. А., КУЛАК Е. М., КЛИМЕНКО Л. А., МІРОШНИК А. М. Метод аналізу помилок умов переходів станів у графових моделях кінцевих автоматів для систем автоматизованого синтезу	107
ЗАДОРЖНИЙ А. О., СТАХОВСЬКИЙ О. В., ЧОВНЮК Ю. В., КЛІМОВ О. П., ГРИНЮК В. В. Мехатронні модулі руху гусеничних машин: моделювання, теоретичний аналіз періодичних та стохастичних автоколивань у системах «двигун – регулятор швидкості обертання ротора»	118
ФОМІН О. В., КОЗИНКА О. С. Класифікаційний підхід щодо вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів	126
ГАЙДУК Д. А. Формування моделі функціонування залізничної транспортної мережі в умовах виникнення відмов і недоступності маршруту	

.....138

КУСТОВ В. Ф., ПРИЛИПКО А. А.

Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики

.....144

БРИКСІН В. О., ЗАРИЦЬКИЙ А. М

Визначення ефективності використання методів глибокого навчання для виявлення полів технічних культур за допомогою аналізу супутникових зображень

.....159

БЕРЕСТОВ І.В., КОЛІСНИК А.В., ПЕСТРЕМЕНКО-СКРИПКА О.С.,ШПЕК Т.В. ,МИКИТАСЬ О.-М.С.

Аналіз сучасних підходів до управління логістичними процесами на основі прогнозування надходження контейнеропотоків до логістичних хабів

.....168

623.746.8:534.8

DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.335304

КАНЄВСЬКИЙ М. В., здобувач другого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту,
СЕМИКРАС А. І., здобувач першого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту,
ЗМІЙ С. О., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту,
ЩЕБЛИКІНА О. В., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту

Акустична система моніторингу повітряного простору: новий рівень виявлення безпілотних літальних апаратів

***Анотація.** У роботі подано комплексний проєкт пристрою на базі акустичної системи моніторингу повітряного простору, розроблений для розв'язання актуальної проблеми своєчасного виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). В умовах швидкого розвитку технологій БПЛА стають усе більш поширеною загрозою для приватності, комерційної безпеки та громадського порядку. Особливу увагу в роботі приділено захисту комерційних і громадських об'єктів, що обумовлює специфічні вимоги до системи виявлення.*

У рамках дослідження проаналізовано сучасні методи виявлення БПЛА, включаючи їхні сильні та слабкі сторони. Вибираючи систему виявлення, особливу увагу приділяли можливості виявлення малогабаритних БПЛА на невеликих відстанях, що є критично важливим для гарантування безпеки в умовах міської забудови та обмеженого простору. Акустичні системи завдяки своїй відносно низькій вартості, простоті інтеграції та можливості ефективного виявлення звукових сигнатур є перспективним рішенням для таких завдань.

Спроектована система виявлення використовує обертові направлені мікрофони для підвищення точності визначення джерела звуку. Описано принцип роботи системи, що базована на виявленні та аналізі акустичних сигналів, які видають БПЛА під час польоту.

Проведені детальні розрахунки точності та похибок позиціонування БПЛА з використанням кутових (AoA) і часових (TDoA) методів локації. Проаналізовано вплив різних факторів, таких як атмосферні умови (температура, вітер), на точність акустичного виявлення та запропоновані способи компенсації їхнього негативного впливу.

Крім того, розглянуто застосування сучасних методів машинного навчання, зокрема згорткових і рекурентних нейронних мереж, для виявлення та класифікації БПЛА за їхніми акустичними сигнатурами. Це дає змогу не тільки виявляти присутність БПЛА, але й ідентифікувати їхній тип і модель, що є важливим для реагування на потенційні загрози.

Результати дослідження демонструють можливість створення ефективної та надійної системи акустичного моніторингу повітряного простору, орієнтованої на захист комерційних і громадських об'єктів шляхом своєчасного виявлення малогабаритних БПЛА на невеликих відстанях.

***Ключові слова:** акустична система, моніторинг повітряного простору, безпілотні літальні апарати, кутова локалізація (AoA), часова локалізація (TDoA).*

© КАНЄВСЬКИЙ М. В., СЕМИКРАС А. І., ЗМІЙ С. О., ЩЕБЛИКІНА О. В., 2025

Вступ

У сучасних умовах розвитку технологій зростає потреба у своєчасному виявленні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що становлять потенційну загрозу для приватного простору, комерційної безпеки та громадського порядку. Особливе значення це питання має для запобігання комерційному шпигунству, захисту приватної власності та уникненню втручання в конфіденційні зони. Ефективний моніторинг повітряного простору стає критично важливим для цивільного сектору, де доступ до складних систем виявлення часто обмежений.

Перспективним рішенням для таких завдань є розроблення системи виявлення БПЛА на основі акустичних датчиків або спрямованих мікрофонів, які здатні фіксувати звуки, створювані двигунами або гвинтами літальних апаратів, і визначати їхнє місцезнаходження. Основний принцип роботи системи полягає у виявленні та аналізі акустичних сигналів, що виникають під час роботи БПЛА.

За допомогою спрямованих мікрофонів система здатна фіксувати специфічні шуми навіть на значних відстанях. Програмне забезпечення аналізує отримані сигнали та порівнює їх із зразками відомих типів літальних апаратів. Це дає змогу не лише виявляти БПЛА, але й класифікувати їх за акустичними характеристиками, визначаючи потенційно небезпечні об'єкти.

Визначають напрямок, висоту і швидкість руху об'єкта за допомогою методів тріангуляції та обробки сигналів із декількох мікрофонних установок. Система може автоматично супроводжувати об'єкт, передаючи координати для відповідних дій, таких як сповіщення служб безпеки чи активація захисних засобів.

Перевагою такої системи є її компактність, щоб легко інтегрувати її у приватні об'єкти, офісні будівлі або громадські простори. Система має низьке енергоспоживання, що забезпечує тривалу автономну роботу навіть у складних умовах. Її модульна структура дає змогу адаптувати функціонал під конкретні потреби користувачів, включаючи оновлення для реагування на нові загрози.

Важливою перевагою є можливість інтеграції з іншими системами безпеки, такими як відеоспостереження або радіолокаційні установки, для створення єдиної інформаційної мережі, щоб забезпечити оперативний обмін даними та швидко реагувати на загрози.

Упровадження таких технологій значно підвищить рівень безпеки в цивільному секторі, своєчасно виявляючи та нейтралізуючи потенційні ризики, сприяючи захисту приватного простору, конфіденційної інформації та громадського спокою.

Аналіз методів виявлення БПЛА.

Радарні системи мають значну дальність виявлення (до 10 км) і високу точність, але їх відрізняє значна вартість, складність обслуговування і порівняно низька ефективність з виявленням малих об'єктів [1]. Радіочастотні системи здатні перехоплювати сигнали управління БПЛА, що дає змогу визначати їхні координати. Проте вони мають обмеження в точному визначенні напрямку (азимут, кут місця) і неефективні для виявлення об'єктів, які використовують провідникове управління, тобто передають сигнали по дротах, а не за допомогою радіочастот [2]. Оптичні системи, на кшталт відеоспостереження, дають змогу дуже точно розпізнавати об'єкти і корисні для ідентифікації, але їхня ефективність знижується в умовах недостатнього освітлення, обмеженої видимості або на великій відстані [3, 4].

Серед досліджених методів особливо виділяють акустичні системи [5-9]. Їхніми основними перевагами є відносно низька вартість і простота інтеграції в існуючу інфраструктуру. Хоча їхня дальність виявлення обмежена 300–500 м, цього цілком достатньо для вирішення завдань захисту приватних територій, забезпечення комерційної безпеки та підтримки громадського порядку. Акустичні системи фіксують звукові хвилі, що генерують двигуни чи гвинти літальних пристроїв, та аналізують їх за допомогою сучасних алгоритмів обробки сигналів, таких як мел-кепстральні коефіцієнти (MFCC). Завдяки використанню тріангуляції та класифікації за допомогою машинного навчання система здатна точно визначати місцезнаходження і тип об'єкта.

Розвиток систем виявлення

Здавна звук був першим сигналом, що сповіщав про щось важливе, передвіщаючи зміни навколишнього світу. Шелест листя попереджав про наближення здобичі або хижака, гуркіт грому віщував негоду, а далекий тупіт копит – про наближення вершників, які приносили радісні чи сумні новини. Людський слух, відточений тисячоліттями еволюції, здатний розрізняти найтонші нюанси звукового середовища, виокремлюючи значущі сигнали з хаосу шуму.

Саме тому здатність визначати і тлумачити звуки завжди була основною для виживання та розвитку людства. Звук – це не просто фізичне явище, а інформація, закодована в коливаннях повітря. Він доносить до нас відомості про далекі події, приховані об'єкти, невидимі загрози.

Із розвитком цивілізації змінювалися і способи використання звуку. Від примітивних слухових труб, що допомагали мореплавцям вловлювати шум наближення шторму, до складних гідроакустичних систем, здатних виявляти підводні човни на відстані сотень кілометрів, людство

навчилася не лише пасивно сприймати звуки, а й активно застосовувати їх для дослідження світу.

Одним із найважливіших напрямів такого дослідження стала акустична локація – метод визначення положення об'єктів через аналіз звукових хвиль. Вона знайшла широке застосування в різних сферах – від військової справи до медицини, від навігації до геології. Історія акустичної локації – це історія постійного вдосконалення методів генерації, виявлення та обробки звукових сигналів, історія створення дедалі чутливіших і точніших приладів, здатних «бачити» світ за допомогою звуку.

У сфері акустичної локації між Першою і Другою світовими війнами можна виділити два головні завдання: виявлення літальних цілей ворога та визначення його наземних вогневих позицій (артилерії). Такий розподіл був насамперед пов'язаний із напрямком, з якого очікували надходження звуку: із неба під деяким кутом до горизонту чи за кілька кілометрів із поверхні землі. Тут слід зазначити, що першочерговим завданням

щодо літальних об'єктів було саме їх виявлення, щоб екіпажі зенітних гармат мали певний час на підготовку до зіткнення. Зважаючи на наявні на той час технології, точне (або, щонайменше, приблизне) позиціонування літальних цілей було неможливе, оскільки навіть попередження про авіаналіт у середньому надходило за кілька хвилин до прибуття ворожих літаків [10]. Щоб розширити можливості акустичної локації, було вирішено створювати спочатку стаціонарні, а згодом мобільні пункти виявлення. Оскільки приймачем звукових коливань слугував слуховий апарат людини, то єдиним відносно дешевим та ефективним методом підвищення рівня чутливості системи було збільшення апертури. Першими на практиці це застосували британці, встановивши бетонні рефлектори, близькі за формою до параболічного дзеркала, розміри якого сягали десятків метрів (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Фото акустичних дзеркал раннього попередження:

а – база королівських повітряних сил Великої Британії;

б – дзеркало (4.5 м) у Кінсі, Велика Британія

Очевидно, що чутливість такого «датчика» звуку значно зростала, але разом із нею збільшувалася його «сліпа зона». Значна спрямованість завдяки використанню параболічної форми рефлектора обмежувала робочий кут такої системи та не давала значного виграшу в максимальній відстані реєстрації для об'єктів, які були далеко від «оптичної осі» такого акустичного дзеркала. Проте всі ці недоліки не мали великого значення, оскільки основним завданням було виявлення літальних цілей на якомога більшій відстані від бази. Тому правильно підібрані параметри такого рефлектора і невеликий кут його

нахилу до горизонту робили свою справу. Значні розміри систем попереднього виявлення літальних цілей і їхня стаціонарність (легкість виявлення та знищення) у період між двома війнами змусили дослідників переглянути ефективність застосування таких пристроїв. Наступним кроком розвитку цієї технології стало розроблення і створення мобільних систем акустичної локації (рис. 2). Загалом на той момент вже існувало три основні типи системи [11]: індивідуальні/переносні рупори; мобільні (на колесах) рупорні пости; стаціонарні тарілки/рефлектори і стіни-дзеркала.



а



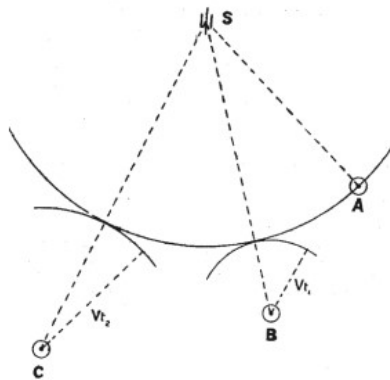
б

Рис. 2. Фото акустичних локаторів часів Другої світової війни:

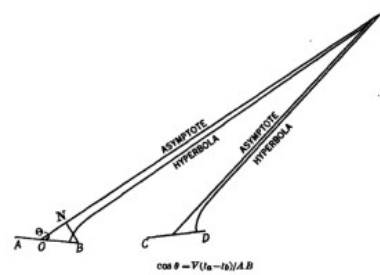
а – звуколокаційний пост, Німеччина; б – мобільний пост моделі ТЗ, 1927 р.

Це стало поштовхом до розвитку технології артилерійської звукової розвідки, основне завдання якої полягало у визначенні місця розташування артилерійської зброї ворога за звуком пострілу від неї. Рухливість систем накладала певні обмеження на їхні габарити і вагу, що змусило інженерів перейти від одного величезного бетонного дзеркала до відносно невеликих масивів рупорів, які хвилеводами були під'єднані до навушників, які використовувала людина для прослуховування «звукового ефіру» (рис. 2, а).

На початкових етапах розвитку акустичної локації двома основними методами визначення положення ворожої техніки на полі бою були трилатерація і триангуляція. Координати джерела звуку з використанням першого знаходять через побудову системи трикутників і вимірювання всіх їхніх сторін. Метод триангуляції [12] полягає у вимірюванні кутів усіх цих трикутників. Незважаючи на принципову різницю між цими двома методами, обидва потребують вимірювання різниць часу проходження одного і того самого звукового сигналу від джерела до окремих приймачів (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Приклади схем ранніх методів звуколокації:

а – схема трилатерації [13]; б – схема триангуляції [12]

Важливим кроком у розвитку акустичної локації стало створення низькочастотного мікрофона [13] у 1916 р. Цей винахід дав змогу частково автоматизувати процес реєстрації звуку та підвищити точність вимірювань. Об'єднання кількох мікрофонів

у мережу з передаванням сигналів до центру обробки даних прискорило збір і аналіз інформації. Завдяки цьому вдалося усунути похибку, пов'язану з часом реакції людини на подразник (рис. 4).

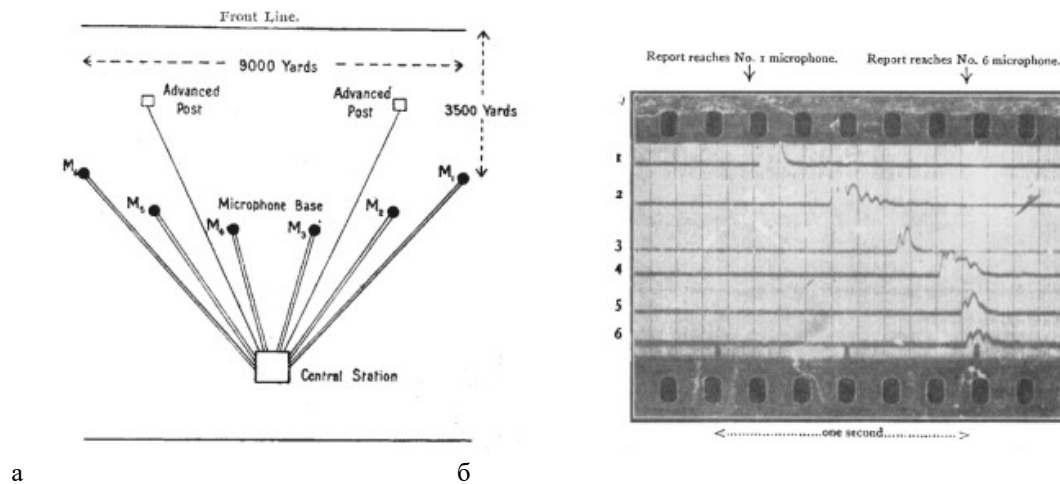


Рис. 4. Бойовий порядок ранніх акустичних вимірювальних постів:

а – схема посту; б – приклад запису звукових сигналів на плівку

Вимірювальна система складалася з двох оглядових пунктів для реєстрації світлового спалаху від пострілу та шести мікрофонів, підключених до центру обробки. Оглядові пункти фіксували момент пострілу з високою точністю, оскільки швидкість світла значно перевищує швидкість звуку. Система займала близько 9 км уздовж лінії фронту, а дані записували на фотоплівку після отримання сигналу з обох оглядових пунктів.

Вплив людського фактора на точність вимірювань був значним. Дослідження показали [13], що середня похибка визначення часу реєстрації звуку людиною становила 0,1 с, тоді як для отримання прийнятних результатів вона мала бути не більше 0,005 с. Крім того, на точність вимірювань впливали коливання параметрів атмосфери, які не враховували математичні моделі.

Однією з основних проблем було розрізнення звуку пострілу від надзвукової ударної хвилі, що створювало додаткові труднощі для аналізу записів.

Розрахунки позиціонування БПЛА

Метод виявлення БПЛА за допомогою мікрофонів спирається на аналіз акустичних особливостей, які генерує літальний об'єкт під час руху. Головними джерелами звуку є електродвигуни, пропелери і аеродинамічний шум, що виникає через взаємодію повітря з корпусом БПЛА. Виявлення відбувається за допомогою масиву мікрофонів, які фіксують акустичний сигнал, після чого, застосовуючи методи кутової (AoA) [13, 14] і часової (TDoA) локалізації [15], визначають місцезнаходження джерела звуку.

Кутовий метод визначення напрямку на джерело звуку (Angle of Arrival, AoA) базований на аналізі різниці в часі надходження звуку до двох або більше мікрофонів, розміщених на певній відстані один від одного (рис. 5). Коли звукова хвиля надходить не перпендикулярно до осі між

мікрофонами, вона досягне одного з них раніше. Цю різницю в часі визначають за формулою [14]

$$\Delta t = \frac{d \sin(\theta)}{c}, \quad (1)$$

де c – швидкість звуку в повітрі (343 м/с);

d – відстань між мікрофонами;

θ – кут прибуття сигналу.

Виходячи з цього, можна визначити напрямок:

$$\theta = \arcsin \frac{c \cdot \Delta t}{d}. \quad (2)$$

Цей метод дає змогу визначити напрямок на БПЛА, але не його точне розташування.

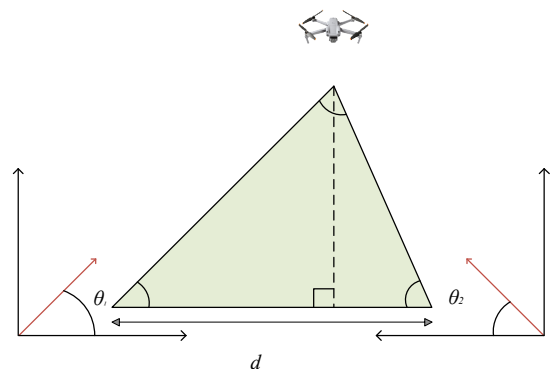


Рис. 5. Розрахунки координат і висоти

Точне позиціонування можливе за допомогою методу різниці часу прибуття звуку (Time Difference of Arrival, TDoA) [15], який базований на розрахунку різниці відстаней від джерела до кількох мікрофонів.

Якщо звук досягає мікрофона 1 раніше, ніж мікрофона 2, то різницю відстаней визначають як

$$\Delta d = c \cdot \Delta t.$$

Це рівняння описує гіперболічне місце точок, на яких може перебувати об'єкт. Для двох мікрофонів рівняння гіперболи виглядає так:

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=\Delta d.$$

Додатковий мікрофон дає змогу отримати другу гіперболу, перетин яких дає точні координати БПЛА. У випадку використання трьох мікрофонів (рис. 6) ми отримуємо систему рівнянь

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=\Delta d_{12},$$

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=\Delta d_{13},$$

де Δd_{12} і Δd_{13} – різниці відстаней між джерелом звуку і відповідними мікрофонами.

Цю систему рівнянь розв'язують числовими методами (наприклад методом Ньютона або найменших квадратів), що дає змогу отримати точні координати об'єкта.

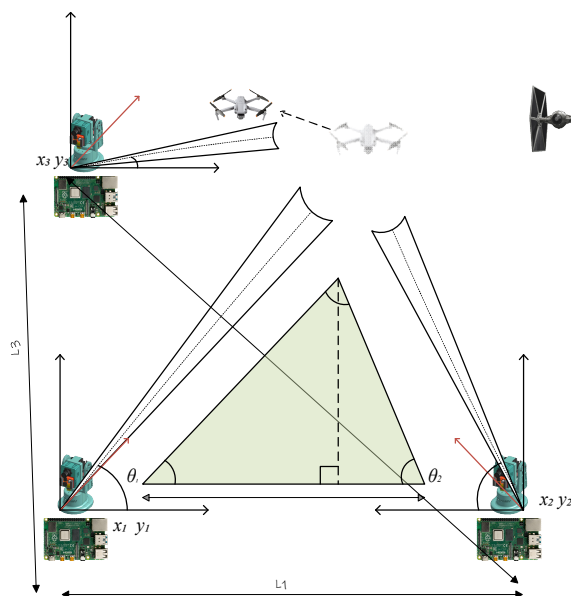


Рис. 6. Розрахунки координат висоти з використанням трьох мікрофонів

Також завдяки цій системі можемо розрахувати швидкість руху об'єкта за методом послідовних позицій. Щоб знайти швидкість, треба виміряти позицію БПЛА у два моменти часу (x_1, y_1) і

(x_2, y_2) , час між позиціями $(t_2 - t_1)$ і розрахувати швидкість за формулою

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{(t_2 - t_1)}. \quad (7)$$

Поєднання методів AoA і TDoA дає змогу підвищити точність визначення місцезнаходження БПЛА, особливо у складних акустичних умовах із фоновими шумами. Використовуючи базу даних акустичних профілів, можна ідентифікувати тип дрона за його шумовими характеристиками. Це може бути реалізовано за допомогою спектрального аналізу та алгоритмів глибокого навчання, що дають змогу відрізнити БПЛА від природних і техногенних шумів.

Акустичний метод виявлення має низку переваг, таких як незалежність від видимості та ефективність у складних погодних умовах. Проте він має обмеження, зокрема чутливість до відбиття звуку від поверхонь і необхідність обробки великої кількості шумових даних. Для покращення точності можна використовувати адаптивні фільтри та алгоритми обробки сигналів, щоб зменшити вплив сторонніх шумів і покращити точність локалізації.

Теоретичний аналіз похибки позиціонування

Точність позиціонування залежить від кута похибки вимірювань $\Delta\theta$ і відстані до об'єкта d .

Для стаціонарного масиву, якщо похибка кутового вимірювання становить $\Delta\theta$, невизначеність положення об'єкта на відстані d визначають як (таблиця)

$$\Delta x = d \cdot \tan(\Delta\theta) \quad (8)$$

Якщо масив має ширину B , то кутова похибка наближено залежить від кутової роздільної здатності масиву:

$$\Delta\theta_{static} \approx \frac{\lambda}{B}. \quad (9)$$

де λ – довжина акустичної хвилі. Для частоти 1000 Гц $\lambda = 0.343$ м.

З шириною масиву $B = 1$ м маємо

$$\Delta\theta_{static} \approx \frac{0.343}{1} = 0.343 \text{ рад} \approx 19.6^\circ.$$

На відстані 100 м невизначеність

$$\Delta x_{static} \approx 100 \cdot \tan(19.6^\circ) \approx 35.6 \text{ м}.$$

Для обертових мікрофонів похибка значно зменшується, оскільки мікрофон точно наведено на джерело (рис. 7). Якщо система має кутову роздільну здатність $\Delta x_{rot} = 1^\circ (0.017 \text{ рад})$, то на 100 м

$$\Delta x_{\text{роз}} = 100 \cdot \tan(0.017) \approx 1.7 \text{ м.}$$

Кутова похибка $\Delta\theta$	19.6° (12)	1°
Невизначеність на 100 м Δx	35.6 м Т	1.7 м
Потрібна кількість мікрофонів	а б д	3
Вимоги механіки	дФ ц я	Відсутні Потрібні моторизовані системи

Параметр	Стационарний мікрофон (ширина 1 м)	Обертвий мікрофон (точність 1°)
----------	--	---------------------------------------

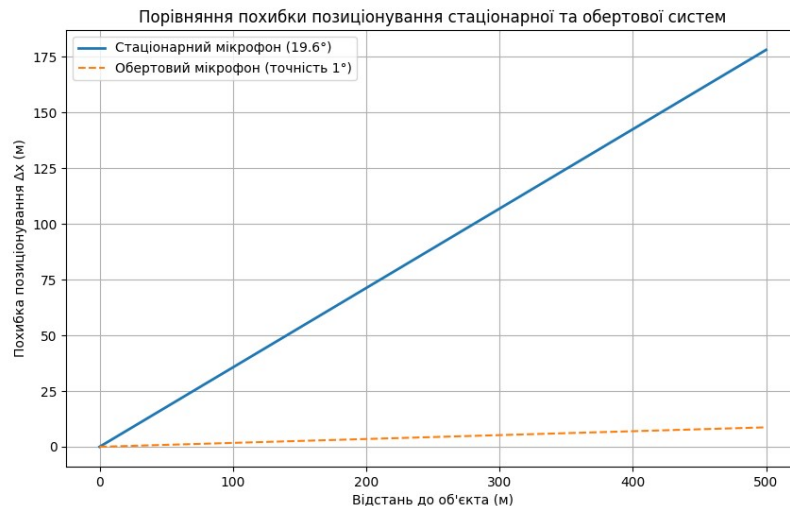


Рис. 7. Порівняння похибки позиціонування для стаціонарних та обертвих систем

Система мікрофонів, що обертаються і спрямовано працюють, значно переважає стаціонарні масиви за точністю визначення розташування БПЛА завдяки здатності динамічно налаштовуватися на джерело звуку та виправляти кутові неточності. Статичні масиви обмежені в зоні охоплення, що потребує застосування більшої кількості мікрофонів або додаткових алгоритмів обробки для поліпшення роздільної здатності. Основне обмеження точності таких масивів криється в залежності від фіксованої конфігурації та необхідності широкої апертури для досягнення високої роздільної здатності. Тоді як оберткові мікрофони здатні зменшити кутову похибку до 1°, забезпечуючи невизначеність у межах 1.7 м на 100-метровій дистанції, стаціонарні масиви завширшки 1 м можуть мати похибку, що перевищує 35 м на аналогічній відстані. Обмежене поле огляду стаціонарних масивів також призводить до виникнення «сліпих зон» і зниження точності визначення напрямку, особливо на краях поля огляду. У разі систем із динамічними мікрофонами, які змінюють кут нахилу та обертаються на 360°, можливе безперервне спостереження за середовищем, що дає змогу здійснювати адаптивний пошук і більш точне визначення розташування об'єкта. Найбільш

ефективний спосіб реалізації такої системи полягає в комбінованому застосуванні AoA і TDoA [16], що дає змогу одночасно визначати напрямок і відстань до БПЛА з високою точністю. Зважаючи на всі ці фактори, можна стверджувати, що для практичного використання виявлення та позиціонування БПЛА найбільш прийнятною є саме система оберткових спрямованих мікрофонів, адже вона забезпечує широкий кут огляду, високу точність визначення координат і адаптивну роботу в реальному часі, не потребуючи розширення мікрофонного масиву.

Вплив атмосферних умов та методи покращення точності виявлення БПЛА

Точність акустичного виявлення БПЛА значною мірою залежить від впливу атмосферних умов і методів обробки сигналів. Основними факторами, що впливають на поширення звуку, є температура, вологість і вітер, які можуть спричинити спотворення сигналу та похибки у визначенні відстані до об'єкта. Швидкість звуку в повітрі змінюється відповідно до температури (рис. 8):

$$c = 331.3 + 0.606 \cdot T,$$

де T – температура повітря, °C. Зі змінюю температурою на 10 °C швидкість звуку змінюється

приблизно на 6 м/с, що призводить до похибки у визначенні відстані

де Δc – зміна швидкості звуку.

$$\Delta d_{temp} = \Delta t \cdot \Delta c, \quad (14)$$

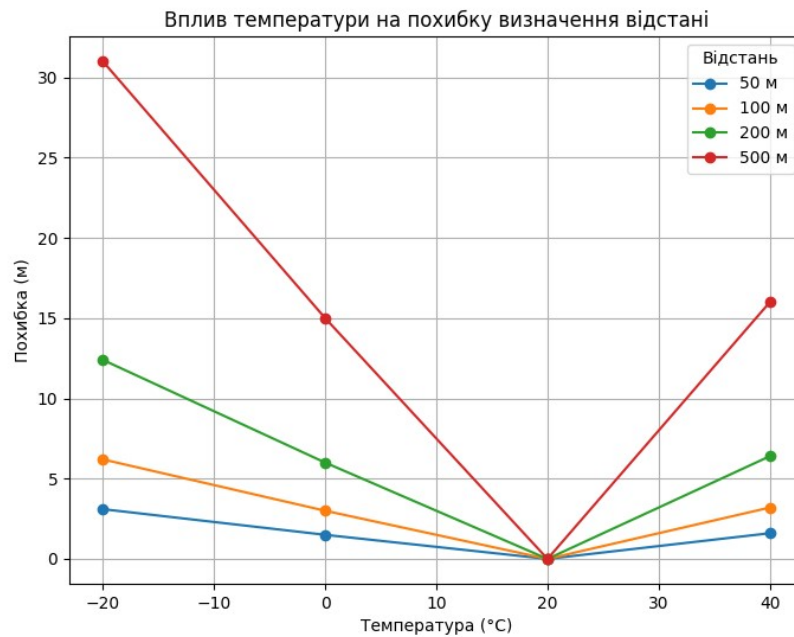


Рис. 8. Розрахунок похибки визначення позиціонування зі зміною температури

Вітер також впливає на поширення звукових хвиль (рис. 9), створюючи додаткову похибку

де v_{wind} – швидкість вітру;

α – кут між напрямком вітру та поширенням звуку.

$$c_{eff} = c + v_{wind} \cdot \cos(\alpha), \quad (15)$$

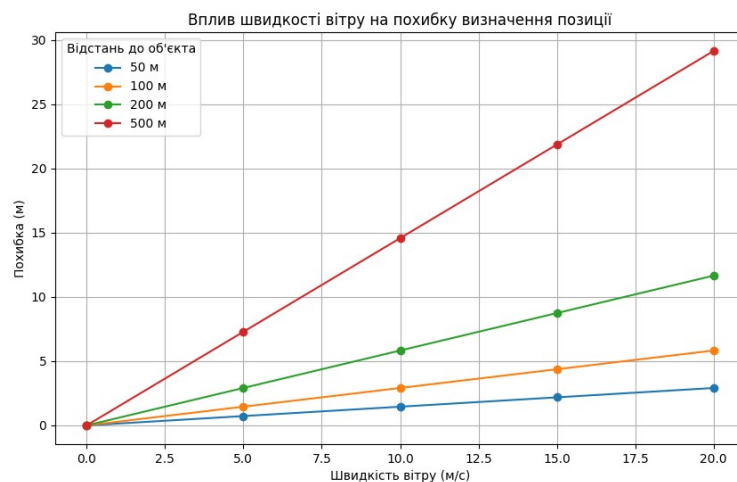


Рис. 9. Розрахунок похибки визначення позиціонування зі зміною швидкості вітру

З метою компенсації цих ефектів система акустичного виявлення має бути регулярно

калібрована. Статичне калібрування передбачає визначення початкового положення мікрофонів, калібрування кутових датчиків і точне вимірювання відстаней між елементами системи. Динамічне

калібрування здійснюване в процесі роботи і включає компенсацію механічних вібрацій, корекцію похибок обертання і точну синхронізацію часу між мікрофонами на рівні мікросекунд.

Покращення точності системи досягають застосуванням адаптивної обробки сигналів. Для фільтрації шумів використовують фільтри Калмана, що допомагають оцінювати траєкторію, вейвлет-перетворення для аналізу частотного складу сигналу, а також алгоритми пригнічення завад. Додатково проводять спектральний аналіз для визначення характерних частот БПЛА, щоб ідентифікувати різні моделі дронів за їхнім акустичним підписом. Високого рівня класифікації досягають застосуванням неймережових методів, де згорткові нейронні мережі використано для розпізнавання спектрограм, рекурентні мережі аналізують часові послідовності, а автоенкодері дають змогу ефективно придушувати шумові компоненти сигналу.

Розраховавши похибку у визначенні положення БПЛА, ураховують кутові похибки вимірювань, температурні та вітрові збурення, а також механічні похибки самої системи. Загальну похибку можна оцінити за рівнянням

$$\Delta_{total} = \sqrt{\Delta_{angle}^2 + \Delta_{temp}^2 + \Delta_{wind}^2 + \Delta_{mech}^2},$$

де Δ_{angle} – похибка кутових вимірювань;

Δ_{temp} – температурний вплив;

Δ_{wind} – ефект від вітру;

Δ_{mech} – механічні похибки системи.

За коректного калібрування та використання алгоритмів адаптивної обробки сигналів можна досягти точності позиціонування на рівні $\pm 1^\circ$ для визначення напрямку, $\pm 2\%$ – для оцінювання відстані та $\pm 5\%$ – визначення висоти польоту об'єкта. Ці показники зберігаються за температури від -20°C до $+40^\circ\text{C}$ і швидкості вітру до 10 м/с, що забезпечує ефективність системи в реальних умовах експлуатації.

Також інтеграція метеостанції дасть змогу суттєво зменшити всі основні похибки акустичної системи виявлення БПЛА, особливо ті, що пов'язані з атмосферними умовами. Це значно підвищить точність визначення місцезнаходження БПЛА, насамперед на великих дистанціях, і зробить систему більш адаптивною до реальних умов експлуатації.

Виявлення та класифікації БПЛА із використанням методів машинного навчання

Одним із методів виявлення БПЛА є аналіз акустичного випромінювання. Основний алгоритм такого підходу передбачає декілька основних кроків [17]. Спектральний аналіз дає змогу розкласти сигнал на складові частоти, використовуючи, зокрема, алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT), щоб створити спектральну характеристику сигналу, що використовують для ідентифікації акустичних особливостей дронів. Наприклад, можна встановити

частоту, амплітуду і спектральну ширину звуку, які вони випромінюють. Завдяки такому аналізу можна отримати відомості про розміри, форму і швидкість польоту БПЛА. Водночас наявність сторонніх шумів, як-от звуки інших літальних апаратів, наземного транспорту або водної поверхні, ускладнює процес.

Метод головних компонент (PCA) допомагає знизити розмірність даних, позбавляючи від кореляції між характеристиками сигналів. Щодо БПЛА, то цей метод дає змогу зосередитися на найбільш значущих акустичних особливостях. Аналізуючи сигнали, отримані з мікрофонів, можна створити матрицю акустичних даних, де кожен рядок відповідає запису з окремого мікрофона. PCA дає змогу виділити найважливіші компоненти, які містять найбільше інформації про структуру сигналу. Це допомагає розрізнити акустичні характеристики БПЛА і фоновий шум. Після цього можна застосувати кластерний аналіз для групування отриманих акустичних сигнатур, що сприяє більш точному визначенню присутності БПЛА в середовищі.

Найбільш ефективним напрямом надійного виявлення БПЛА є комплексне використання інформації, яка надходить із різних фізичних каналів. Проте використання комплексних методів потребує більшої кількості обладнання, що збільшує габарити і вартість таких комплексів, а також зменшує їхню мобільність. Для виявлення БПЛА широкого застосування, які є найбільш затребувані в цивільних і військових завданнях, значну увагу слід приділити дослідженню акустичних методів виявлення БПЛА.

Найпоширенішим методом [17] аналізу акустичних даних є перетворення Фур'є, яке розкладає складний хвильовий процес на елементарні гармонічні коливання та описує його характеристики на основі тригонометричних функцій. Дискретне перетворення Фур'є оцифрованого сигналу обчислюють так:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(-2\pi j k \frac{n}{N}).$$

Дискретне перетворення Фур'є є зручним засобом аналізу внаслідок наочності інтерпретації його результатів, але дає лише узагальнені відомості про спектральний склад сигналу. Гармонічні функції відображують специфічні особливості сигналу (перепади нескінченної крутості, розриви, сходи, піки) лише без обмежень за кількістю членів ряду. На практиці внаслідок обмеження щодо кількості членів ряду Фур'є на околицях стрибків і розривів відновленого сигналу виникають осциляції.

Для розв'язання зазначених проблем використовують короткочасне перетворення Фур'є:

$$S_l(k) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} w(n) \cdot s(n + lH) \cdot \exp(-2\pi j k \frac{n}{N}), l = 0, 1$$

де $w(n)$ – аналітичне вікно;

s – фрагмент вхідного сигналу;

l – індекс, що вказує порядковий номер кадру (або часовий індекс);

H – крок.

Короткочасне перетворення Фур'є дає змогу здійснити перехід від амплітудного до частотно-часового подання сигналу на основі згортки

досліджуваного сигналу та віконної функції. Обчислення ДПФ на кожному інтервалі, що виділений ковзною функцією аналітичного вікна, розкриває особливості нестационарних сигналів.

(18) Структура системи виявлення БПЛА.

Система виявлення та аналізу БПЛА на основі акустичних випромінювань використовує обертові направлені мікрофони, щоб значно підвищити точність визначення джерела шуму в просторі. Робота системи базована на двох основних підсистемах: виявлення акустичного випромінювання і аналізу акустичного випромінювання (рис. 10).

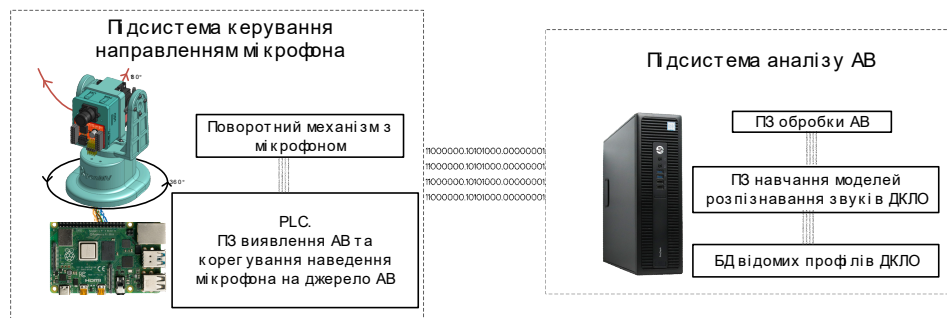


Рис. 10. Структурна схема системи виявлення БПЛА

Підсистема виявлення акустичного випромінювання відповідає за первинне виявлення джерела звуку, його локалізацію в просторі та наведення мікрофона для подальшого аналізу. Мікрофони направленої типу (кардіоїдальні) ефективно фільтрують фоновий шум і виявляють цільові акустичні випромінювання [18, 19]. Вони закріплені на обертовому механізмі (рис. 11), що дає змогу проводити панорамний пошук джерел звуку. Мікрофон закріплено на рухомій платформі, яка має можливість обертатися на 360° у горизонтальній площині та змінювати кут нахилу до 180° у вертикальній площині. Орієнтація мікрофона здійснювана за алгоритмом максимального сигналу, тобто мікрофон спрямований у бік, де сигнал має найбільшу амплітуду (рис. 12).

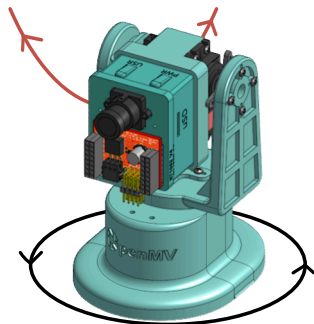


Рис. 11. Обертовий механізм

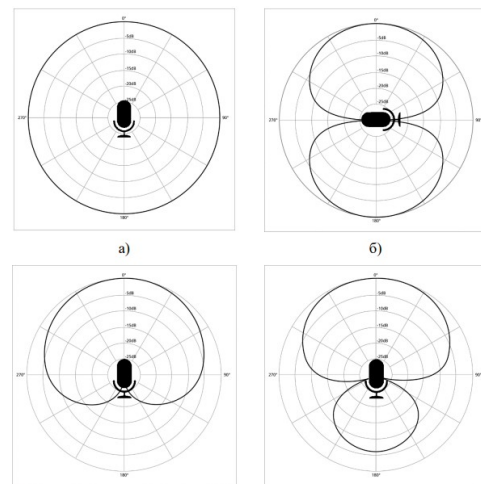


Рис. 12. Діаграма направленості: а – мікрофонів-приймачів тиску;

б – мікрофонів-приймачів градієнтного тиску; в – комбінованих кардіоїдних мікрофонів; г – комбінованих гіперкардіоїдних мікрофонів

Виявляють джерело шуму за допомогою методу кута прибуття звуку (AoA – Angle of Arrival) [13, 14]. Величину кута визначають за фазовою різницею або часовою затримкою сигналу (TDoA –

Time Difference of Arrival) [15] між різними положеннями мікрофона.

Для визначення координат джерела звуку використовують триангуляційний метод. Оскільки обертовий механізм дає змогу отримати кілька вимірювань з різних кутів, то

$$h = d \cdot \frac{\sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2)}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))}$$

Після розрахунку позиції PLC на базі Raspberry Pi передає отримані дані до підсистеми аналізу акустичного випромінювання [20].

Підсистема аналізу акустичного випромінювання ідентифікує та класифікує акустичні профілі БПЛА за допомогою методів машинного навчання і бази даних відомих зразків [2]. Програмне забезпечення підсистеми обробляє отримані сигнали для виділення характерних ознак. Основні параметри, що аналізують:

- Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) – використовують для аналізу спектральної енергетики;

- спектральна ентропія – допомагає визначати структуру шуму;

- Zero-Crossing Rate (ZCR) – аналіз швидкості зміни амплітуди сигналу.

Система використовує Convolutional Recurrent Neural Networks (CRNN), що поєднують згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки спектрограм і рекурентні нейронні мережі (RNN) для аналізу динаміки сигналу.

Оброблений сигнал порівнюють із базою даних акустичних профілів, яка містить відомі характеристики різних моделей БПЛА [21] і зразки шумів природного середовища та міського фону. Якщо знайдено співпадіння з відомою моделлю, система ідентифікує БПЛА і додає його технічні характеристики (модель, дальність, швидкість тощо).

Після завершення аналізу система виводить основні параметри БПЛА: позицію (координати X, Y, Z), висоту польоту, швидкість руху, тип БПЛА (за базою даних). Отримані дані можуть бути передані до систем протиповітряної оборони, центрів моніторингу або автоматизованих систем управління безпекою.

Список використаних джерел

1. Yang S., Luo Y., Miao W., Ge C., Sun W., Luo C. RF Signal-Based UAV Detection and Mode Classification: A Joint Feature Engineering Generator and Multi-Channel Deep Neural Network Approach. *Entropy*. 2021. 23. 1678. <https://doi.org/10.3390/e23121678>.
2. Yang X., Huo K., Jiang W., Zhao J., Qiu Z. A passive radar system for detecting UAV based on the OFDM communication signal. In *Proceedings of the 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 8–11 August 2016*. P. 2757–2762. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735118.
3. Dadrass Javan F., Samadzadegan F., Gholamshahi M., Ashatari Mahini F. A Modified YOLOv4 Deep Learning Network for Vision-Based UAV Recognition. *Drones*. 2022. 6. 160. <https://doi.org/10.3390/drones6070160>.
4. Kim B. H., Khan D., Bohak C., Choi W., Lee H. J., Kim M. Y. V-RBNN Based Small Drone Detection in Augmented Datasets for 3D LADAR System. *Sensors*. 2018. 18. 3825. <https://doi.org/10.3390/s18113825>.
5. Sedunov A., Salloum H., Sutin A., Sedunov N., Tsyuryupa S. UAV Passive Acoustic Detection. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Woburn, MA, USA, 23–24 October 2018*. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/THS.2018.8574129>.
6. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Sheyko S. A., Babkin S. I., Koryttsev I. V., Zubkov O. V., Anokhin M. A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*. 2018. V. 77(10). P. 915-924. DOI:10.30837/rt.2018.4.195.21.
7. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L., Ugo Bordon F. Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging, Imaging and Multimedia Analytics in a Web and Mobile World*. 2017. P. 60-64. DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168.
8. Al-Emadi S., Al-Ali A., Mohammad A., Al-Ali A. Audio based drone detection and identification using deep learning. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 24–28 June 2019*. P. 459–464. DOI:10.1109/IWCMC.2019.8766732.
9. Dumitrescu C., Minea M., Costea I. M., Cosmin Chiva I., Semenescu A. Development of an acoustic system for UAV detection. *Sensors*. 2020. 20, 4870. <https://doi.org/10.3390/s20174870>.
10. Rawlinson A. The defence of London, 1915-1918. London : Andrew M., 1924. P. 267.
11. Douglas S. Acoustic Location and Sound Mirrors. 2011. URL: <https://web.archive.org/web/20110112224410/http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/COMMS/ear/ear.htm> (дата звернення: 11.05.2023).
12. Bateman H. Mathematical theory of sound ranging. *Monthly Weather Review*. 1918. Vol. 46, no. 1. P. 4–11.
13. Sound Ranging. *Nature*. 1919. Vol. 104, no. 2611. P. 278–280.

14. Cheung K. W., So H. C., Ma W. K., Chan Y. T. A Constrained Least Squares Approach to Mobile Positioning: Algorithms and Optimality. *Eurasip J. Adv. Signal Process.* 2006. 2006. 20858. DOI:10.1155/ASP/2006/20858.
15. Wu L., Liu Z. M., Huang Z. T. Deep Convolution Network for Direction of Arrival Estimation With Sparse Prior. *IEEE Signal Process. Lett.* 2019. 26. 1688–1692. DOI:10.1109/LSP.2019.2945115.
16. Yang K., An J., Bu X., Sun G. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2010. 59. 1558–1562. DOI:10.1109/TVT.2009.2037509.
17. Гісцев А. Ю. Алгоритми розпізнавання акустичних сигналів БПЛА. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/10d2f4e5-d28a-45c3-8443-e557c9c2f650/content>.
18. Бугайов М. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 3 (74). С. 46–53.
19. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів. *Вісник ЖДТУ*. 2014. № 4 (71). С. 71–80.
20. Усенко В. Шум повітряних гвинтів. *Наукова думка сучасності і майбутнього*. 2019. 36. 26. Ч. 1. С. 3–5.21.
21. Al-Emadi S. A., Al-Ali A. K., Al-Ali A., Mohamed A. Audio Based Drone Detection and Identification using Deep Learning. In *Proceedings of the IWCMC 2019 Vehicular Symposium (IWCMC-VehicularCom 2019)*, Tangier, Morocco, 24–28 June 2019. DOI: 10.18372/2310-5461.41.13542.

Acoustic airspace monitoring system: a new level of unmanned aerial vehicle detection

Abstract. *The paper presents a comprehensive project for a device based on an acoustic airspace monitoring system, designed to address the pressing issue of timely detection of unmanned aerial vehicles (UAVs). With the rapid development of technology, UAVs are becoming an increasingly widespread threat to privacy, commercial security and public order. Particular attention is paid to the protection of commercial and public facilities, which determines the specific requirements for the detection system.*

The study analyses existing methods of UAV detection, including their strengths and weaknesses. When selecting a detection system, special attention was paid to the ability to detect small UAVs at short distances, which is critical for ensuring safety in urban areas and confined spaces. Acoustic systems, due to their relatively low cost, ease of integration, and ability to effectively detect sound signatures, are a promising solution for such tasks.

The designed detection system uses rotating directional microphones to improve the accuracy of sound source determination. The principle of operation of the system is described, which is based on the detection and analysis of acoustic signals emitted by UAVs during flight.

During the study, detailed calculations of the accuracy and positioning errors of UAVs were performed using angular (AoA) and time (TDoA) location methods. The influence of various factors, such as atmospheric conditions (temperature, wind), on the accuracy of acoustic detection is analysed, and methods for compensating for their negative impact are proposed.

In addition, the application of modern machine learning methods, in particular convolutional and recurrent neural networks, for the detection and classification of UAVs by their acoustic signatures was considered. This allows not only to detect the presence of UAVs, but also to identify their type and model, which is important for responding to potential threats.

The results of the study demonstrate the possibility of creating an effective and reliable acoustic airspace monitoring system focused on protecting commercial and public facilities by timely detection of small UAVs at short distances.

Keywords: *acoustic system, airspace monitoring, unmanned aerial vehicles, angle of arrival (AoA), time difference of arrival (TDoA).*

Канєвський Максим Володимирович, здобувач другого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua.

Семикрас Андрій Ігорович, здобувач першого рівня вищої освіти, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: asemikras714@gmail.com.

Змій Сергій Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

Щебликіна Олена Вікторівна, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: sov@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885.

Maksym Kanovskii, second-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua.

Andrii Semykras, first-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: asemikras714@gmail.com.

Serhii Zmii, 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>. Scopus Author ID: 57192821601.

Olena Shcheblykina, Associate Professor, Department of Automation and Computerized Train Control, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sov@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885.

ОГАР О. М., д.т.н., професор кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

КУЦЕНКО М. Ю., к.т.н., доцент кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

ГУРІН Д. О., к.т.н., асистент кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

КОНДРАТЬЄВ І. В., аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

ЛЕВЧЕНКО А. О., аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту

Розроблення методу розрахунку швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням

***Анотація.** Доведено складність завдання прицільного регулювання швидкості скочування відчепів. Розроблено метод розрахунку швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням. Метод базований на процедурі визначення приблизних значень основного питомого опору руху відчепа і питомого опору його руху від повітряного середовища і вітру та оптимізації швидкості виходу відчепа з паркових уповільнювачів. Для використання запропонованого методу на практиці розроблено архітектуру автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами.*

***Ключові слова:** прицільне гальмування, регулювання швидкості, відчеп, сортувальний пристрій, гальмова позиція, вагонний уповільнювач, опір руху.*

Постановка проблеми

Прицільне регулювання швидкості скочування відчепів у сортувальному парку є одним із найважливіших і водночас найскладніших етапів процесу сортування вагонів. Суть проблеми полягає в необхідності забезпечення такого режиму руху кожного окремого відчепа, щоб він досяг точки прицілювання з допустимою швидкістю співударяння вагонів і не створив «вікно» на підгірковій колії.

На вирішення цієї проблеми впливає багато факторів. Основними з них є різноманітність характеристик вагонів, зміна зовнішніх умов, неоднорідність профілю колій, труднощі в налаштуванні гальмівних засобів, необхідність швидкого ухвалення рішень операторами гальмових позицій та інші.

Якщо ширше аналізувати вплив зазначених факторів, то слід зазначити таке.

Відчепи мають різну вагу, довжину, технічний стан та основний питомий опір. Це безпосередньо впливає на прискорення та уповільнення їх під час скочування. Одні й ті самі гальмівні зусилля можуть бути недостатніми або надмірними для різних вагонів.

Такі погодні умови, як дощ, сніг, ожеледь, призводять до зниження коефіцієнта тертя між колесами вагонів і рейками, у результаті чого змінюється динаміка руху, що ускладнює точне регулювання швидкості відчепів на парковій гальмовій позиції (ПГП).

Незначні ухили або підйоми на сортувальних коліях також можуть призводити до істотних змін у швидкості руху відчепів. Особливо важко прицільно відрегулювати швидкість на коліях зі складним профілем.

Ефективність гальмових засобів ПГП може варіюватися залежно від їхнього технічного стану, затримок у спрацьовуванні, неправильного вибору сили гальмування.

Часто у процесі сортування вагонів операторам необхідно в режимі реального часу реагувати на зміну ситуації, для чого потрібні висока кваліфікація та швидка корекція параметрів скочування.

Відомими наслідками неякісного регулювання швидкості є пошкодження вантажу і вагонів та аварійні ситуації в разі зіткнення вагонів із сильним ударом, потреба в додатковому втручанні у випадку зупинки відчепів на сортувальній колії, порушення ритму роботи сортувального парку.

Зазначена проблема має місце і за застосування сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останніх опублікованих дослідженнях активно розглядають проблематику прицільного регулювання швидкості скочування відчепів на сортувальних гірках. Так, у статті [2] розроблено ймовірнісний підхід для визначення допустимих режимів гальмування відчепів в умовах невизначеності їхніх ходових характеристик. Запропоновано два критерії оцінювання режимів гальмування:

- середня величина «вікна» на сортувальній колії за встановлених норм імовірності перевищення допустимих швидкостей зіткнення вагонів і зупинки їх у уповільнювачах;

- ризик нерозділення відчепів на стрілочних переводах.

У результаті досліджень встановлено конфігурацію області допустимих швидкостей виходу відчепів із гальмових позицій, що забезпечує безпечне розділення відчепів на стрілочних переводах та уповільнювачах. Розроблена методика дає змогу спростити вибір режимів гальмування відчепів у системах автоматичного керування швидкістю їхнього скочування.

У статті [3] розглянуто вплив зниження сили притискання вагонних уповільнювачів на безпеку сортувального процесу. Автори запропонували комплекс залежностей, що визначають вимоги щодо

потужності гальмівних пристроїв і можуть встановлювати відповідні обмеження для режимів розформування составів поїздів, забезпечуючи маневрові операції.

Інше дослідження [4] присвячено вирішенню актуального завдання оптимізації швидкості виходу вагонів із вагонних уповільнювачів на сортувальних гірках з урахуванням таких випадкових факторів, як опір коченню вагонів, швидкість і напрямок вітру, похибки в роботі гальмівних пристроїв. У роботі визначено діапазон допустимих початкових швидкостей виходу вагонів із гальмівних позицій, який забезпечує розділення відчепів на стрілочних переводах, і запропоновано методику, що дає змогу спростити вибір режимів гальмування в автоматизованих системах керування сортувальними гірками.

У роботі [5] також проаналізовано вплив випадкових факторів, таких як питомий опір руху, погодні умови та похибки в роботі гальмівних пристроїв, на точність прогнозування швидкості і тривалості скочування відчепів. Використовуючи методи імітаційного моделювання і статистичного аналізу, автори встановили, що основними факторами, що впливають на середньоквадратичне відхилення тривалості скочування, є довжина дільниці вільного скочування та задана швидкість виходу відчепа з гальмових позицій.

У статті [6] формалізовано та вирішено завдання пошуку оптимальних режимів гальмування всіх відчепів состава, які забезпечують надійні умови розділення суміжних відчепів на стрілочних переводах і гальмових позиціях спускної частини гірки, шляхом застосування ітераційної процедури оптимізації зазначених режимів. Запропонований метод може бути використаний для дослідження процесу розформування составів поїздів, а також у системах автоматизації технологічних операцій на сортувальних гірках.

Дослідження, що опубліковано у статті [7], присвячено застосуванню нечітких нейронних мереж для прогнозування швидкості виходу відчепів на сортувальних гірках із метою забезпечення безпечного та ефективного сортування вагонів, ураховуючи складні та змінні умови експлуатації. Запропонований підхід дає змогу моделі адаптуватися до невизначеності та варіабельності вхідних даних, таких як маса та довжина відчепів, опір коченню, погодні умови і технічний стан гальмівних пристроїв. Модель навчали на основі реальних даних, зібраних із сортувальних станцій, щоб урахувати широкий спектр експлуатаційних ситуацій. Дослідження демонструє ефективність використання нечітких нейронних мереж для вирішення складних завдань управління на залізничному транспорті. За допомогою цього підходу

можна підвищити безпеку та ефективність сортувального процесу, зменшити ризик зіткнень і оптимізувати використання гальмівних пристроїв.

Отже, сучасні дослідження в галузі прицільного регулювання швидкості скочування відцепів зосереджені на оптимізації алгоритмів управління для забезпечення безпеки та ефективності сортувального процесу, урахуванні випадкових факторів, що впливають на точність прогнозування руху відцепів, підвищенні ефективності функціонування гальмівних пристроїв і розробленні методів контролю в умовах їхньої зниженої потужності. Ці дослідження сприяють вдосконаленню систем автоматичного керування сортувальним процесом, підвищуючи їхню надійність і ефективність.

Разом із тим слід зазначити, що основною перешкодою на шляху досягнення високої ефективності прицільного регулювання швидкості скочування відцепів є відсутність процедур розрахунку приблизних значень питомих опорів руху відчепа, що мають стохастичну природу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

На сьогодні невирішеним питанням є забезпечення достатньої точності розрахунку швидкості виходу відцепів із ППП за наявності множини випадкових факторів. Слід зазначити, що точне значення основного питомого опору руху відчепа невідомо. Цей опір розглядають як випадкову величину, що підпорядкована гамма-розподілу [8]. Також невідомо точне значення питомого опору руху відцепів від повітряного середовища і вітру. Цей опір залежить від швидкості і напрямку вітру, які можуть суттєво змінюватися протягом коротких проміжків часу, і спрогнозувати його величину після виходу відчепа з ППП до моменту зупинки на сортувальній колії або зіткнення з вагонами дуже складно. Крім того, величина зазначеного опору залежить від середньої швидкості відчепа на ділянці скочування, а щоб визначити середню швидкість, необхідно знати початкову швидкість – швидкість виходу відчепа з ППП, яку потрібно визначити спочатку.

Отже, для підвищення точності розрахунку швидкості виходу відчепа з ППП необхідно розробити процедуру розрахунку приблизних значень питомих опорів руху відчепа, що мають випадковий характер.

Формулювання мети

Метою дослідження є підвищення ефективності регулювання швидкості скочування відцепів на ППП сортувального пристрою з гравітаційно-прицілним їх гальмуванням. Для цього

необхідно розробити метод розрахунку швидкості виходу відцепів із ППП на основі визначення приблизних значень основного питомого опору їхнього руху і питомого опору їхнього руху від повітряного середовища і вітру та оптимізації вказаних швидкостей. Це дасть змогу забезпечити допустиму швидкість співударяння вагонів і мінімізувати довжину «вікон» на коліях сортувального парку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розрахункову швидкість виходу відчепа з ППП розраховують за формулою

$$V_{\text{вих}}^{\text{ППП}} = \sqrt{V_{\text{снів}}^2 + 2 \cdot g' \cdot (i_{\text{СП}} - \omega) \cdot l_{\text{проб}} \cdot 10^3}, \quad (1)$$

де $V_{\text{снів}}$ – допустима швидкість співударяння відцепів, м/с;

g' – приведенне прискорення вільного падіння з урахуванням інерції маси елементів відчепа, що обертаються, м/с²;

$i_{\text{СП}}$ – ухил поздовжнього профілю колій сортувального парку, ‰;

ω – питомий опір руху відчепа, Н/кН;

$l_{\text{проб}}$ – відстань, яку необхідно подолати відчепу з моменту виходу з ППП до точки прицілювання (ТП), м,

$$l_{\text{проб}} = l_{\text{ППП-ТП}} - l_{\text{відч}}, \quad (2)$$

де $l_{\text{ППП-ТП}}$ – відстань від кінця ППП до ТП, м;

$l_{\text{відч}}$ – довжина відчепа за осями автозчеплень, м.

З виходом відцепів із ППП на швидкість їх скочування впливають чотири види питомого опору: основний питомий опір руху (ω_0), питомий опір руху від повітряного середовища і вітру ($\omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}$), питомий опір руху від криволінійної ділянки колії (за наявності її на коліях сортувального парку) ($\omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}$) і

питомий опір руху відчепів від снігу та інею ($\omega_{сн.}^{СП}$).

Отже,

$$\omega = \omega_0 + \omega_{CB}^{СП} + \omega_{кр.}^{СП} + \omega_{сн.}^{СП}. \quad (3)$$

Підвищити точність розрахунку швидкості виходу відчепів із ПГП можна впровадженням на

сортувальному пристрої з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами (АСКПУ), структуру якої наведено на рис. 1.

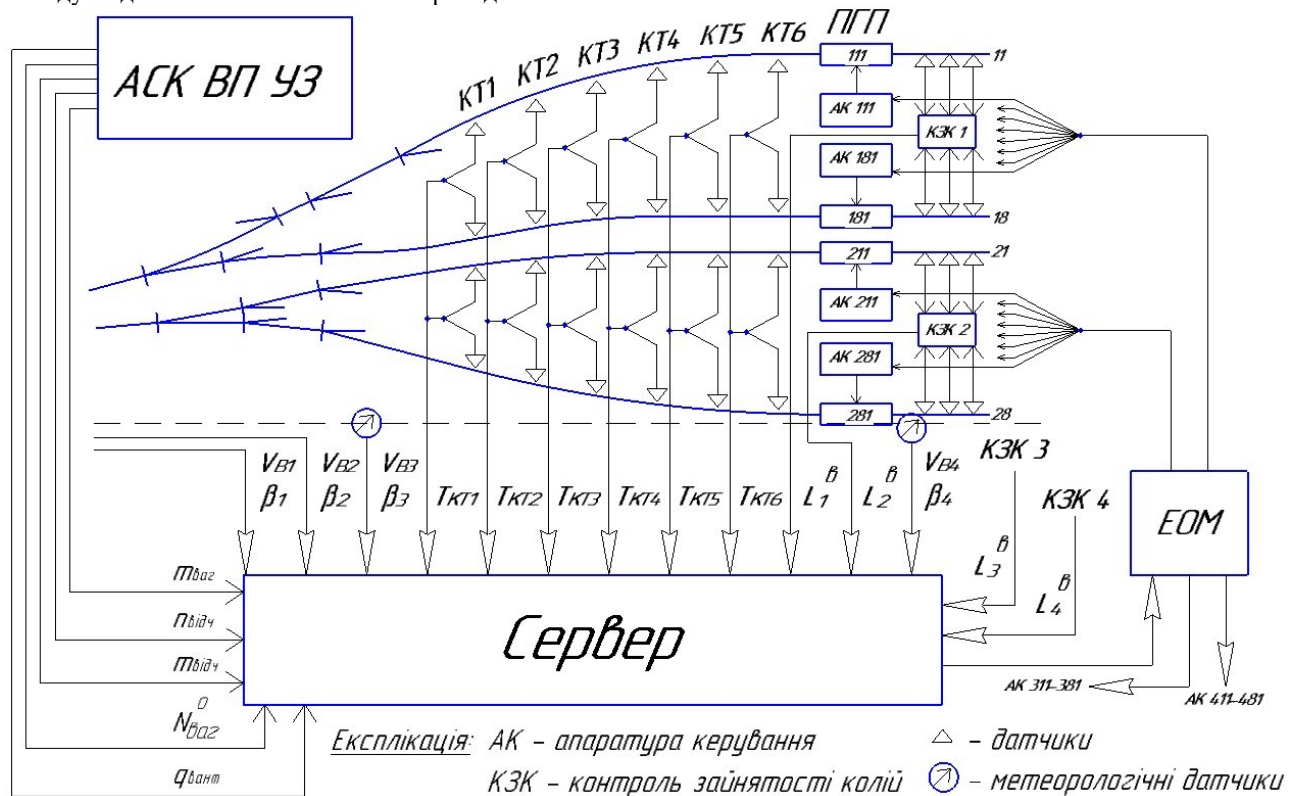


Рис. 1. Архітектура автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами

Протягом часу руху першої осі відчепа, обмеженого моментами проходження нею контрольних точок (КТ) 1 і 6, АСКПУ фіксує та зберігає в сервері поточні значення швидкості і напрямку вітру в місці розташування кожного метеорологічного датчика та моменти проходження цієї віссю КТ1 ($T_{КТ1}$), КТ2 ($T_{КТ2}$), КТ3 ($T_{КТ3}$), КТ4 ($T_{КТ4}$), КТ5 ($T_{КТ5}$) і КТ6 ($T_{КТ6}$). На основі інформації про моменти проходження першою віссю відчепа контрольних точок і з урахуванням відстані між цими точками розраховують середні швидкості відчепа на ділянках КТ1-КТ2, КТ2-КТ3, КТ3-КТ4, КТ4-КТ5 і КТ5-КТ6 і будують залежність швидкості відчепа від часу $V = V(t)$, де $t \in [T_{КТ1}; T_{КТ6}]$. Також у вказаний проміжок часу будують залежності

від часу швидкості і напрямку вітру, що мають місце в зоні розташування кожного метеорологічного датчика. Зазначені залежності і дані про відчеп (тип, маса і довжина вагонів, кількість осей у кожному вагоні) використовують для розрахунку питомих опорів його руху від криволінійних ділянок і стрілочних переводів ($\omega_{СК}^{КТ1-КТ6}$), Н/кН, повітряного середовища і вітру ($\omega_{CB}^{КТ1-КТ6}$), Н/кН, протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$. Кількість стрілочних переводів і суму кутів повороту, які проходить відчеп у зазначений проміжок часу, і середню крутизну підйому, по якому рухається центр ваги відчепа протягом цього проміжку часу ($i_C^{КТ1-КТ6}$), ‰, визначають на основі вісної моделі вагона.

Зазначених даних достатньо для того, щоб розрахувати приблизне значення основного питомого опору руху відчепа ($\omega_0^П$). У разі розташування ділянки, обмеженої КТ1 і КТ6, на підйомі

$$\omega_0^П = \frac{(V_{КТ1}^2 - V_{КТ6}^2) \cdot 10^3}{2 \cdot g^j \cdot l_{КТ1-КТ6}} - i_C^{КТ1-КТ6} - \omega_{СК}^{КТ1-КТ6} - \omega_{СВ}^{КТ1-КТ6} - \omega_{сн.}^{КТ1-КТ6}, \quad (4)$$

де $V_{КТ1}$, $V_{КТ6}$ – швидкість відчепа в момент проходження його першою віссю відповідно КТ1 і КТ6, м/с;

$l_{КТ1-КТ6}$ – довжина ділянки колії, обмеженої КТ1 і КТ6, м;

$\omega_{сн.}^{КТ1-КТ6}$ – питомий опір руху відчепа від снігу та інею, Н/кН, протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, $\omega_{СН}^{КТ1-КТ6}$ розраховують за галузевими будівельними нормами [8];

$i_C^{КТ1-КТ6}$, $\omega_{СК}^{КТ1-КТ6}$ і $\omega_{СВ}^{КТ1-КТ6}$ – визначають шляхом моделювання руху відчепа одразу після проходження його першої осі КТ6.

Миттєве значення крутизни підйому, яким рухається центр ваги відчепа, ‰, коли його перша вісь знаходиться в точці S [9] ($S \in [S_{КТ1}; S_{КТ6}]$,

де $S_{КТ1}$, $S_{КТ6}$ – координата відповідно КТ1 і КТ6, м),

$$i(S) = \frac{1}{Q_{відч.}} \sum_{j=1}^{m_{відч.}} \frac{Q_{ваг. j}}{n_{ос. j}^{ваг.}} \sum_{r=1}^{n_{ос. j}^{ваг.}} i(S_{rj}), \quad (5)$$

де $Q_{відч.}$, $m_{відч.}$ – відповідно маса відчепа, т, і кількість вагонів у відчепі;

$Q_{ваг. j}$ – маса j -го вагона відчепа, т;

$n_{ос. j}^{ваг.}$ – кількість осей в j -му вагоні відчепа;

S_{rj} – координата точки, у якій знаходиться вісь r j -го вагона, м;

$i(S_{rj})$ – крутизна елемента профілю, на якому знаходиться вісь r j -го вагона, ‰.

Випадкове миттєве значення питомого опору руху відчепа від стрілок і кривих у разі вісної його моделі [9]

$$\omega_{СК}^* = \frac{0,125 V^2}{n_{ос.}^{відч.}} \cdot \sum_{y=1}^{n_{ос.}^{відч.}} \frac{(0,56 \Theta_y + 0,23 \varphi_{b_y}) \cdot \ln(\prod_{x=1}^8 R_{b_x})}{l \alpha_y}, \quad (6)$$

де V – миттєва швидкість відчепа, м/с (визначають на основі залежності $V = V(t)$, яку формує АСКПУ);

$n_{ос.}^{відч.}$ – кількість осей у відчепі;

Θ_{b_y} , $l_{СК b_y}$ – відповідно тип і довжина, м, елемента b , по якому проходить вісь відчепа у ($\Theta_{b_y} = 0$, якщо вісь відчепа у знаходиться у кривій або на прямій ділянці; $\Theta_{b_y} = 1$, якщо у вісь відчепа знаходиться на стрілочному переводі);

φ_{b_y} – кут повороту кривої елемента b , по якому проходить вісь відчепа у, °;

R_{b_x} – випадкові числа, що рівномірно розподілені в інтервалі [0;1], для елемента b .

Миттєве значення питомого опору руху відчепа від середовища і вітру, Н/кН, визначають за формулою [8]

$$\pm \omega_{CB} = \frac{17,8 \cdot \left(C_{x_1} \cdot S_1 \cdot V_{P_1}^2 + \sum_{j=2}^{m_{\text{вагони}}} C_{xx_j} \cdot S_j \cdot V_{P_j}^2 \right)}{(273 + t_n) \cdot \sum_{j=1}^{m_{\text{вагони}}} Q_{\text{ваг.}j}}, \quad (7)$$

де C_{x_1} , C_{xx_j} , S_1 , S_j – значення коефіцієнта миттєвого повітряного опору і площа поперечного перерізу, м², першого і j -го вагона відчепа, де $j \in 2, n$;

t_n – температура зовнішнього повітря, °C;

V_{P_1} , V_{P_j} – результуюча миттєва швидкість вітру відносно першого і j -го вагона відчепа, м/с,

$$V_{P_j} = \sqrt{V^2 + V_{B_j}^2 + 2 \cdot V \cdot V_{B_j} \cdot \cos \beta_{\text{ваг.}j}}, \quad (8)$$

де V_{B_j} – миттєва швидкість вітру в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, м/с;

$\beta_{\text{ваг.}j}$ – миттєвий кут між векторами напрямків руху j -го вагона відчепа і вітру, °,

$$\beta_{\text{ваг.}j} = |\beta_j - \gamma_j|, \quad (9)$$

де β_j – миттєвий напрямок вітру відносно базису гіркової горловини в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, °. β_j можна фіксувати двома варіантами: від 0° до $\pm 180^\circ$ або від 0° до 360°;

γ_j – кут між дотичною до осі колії і базисом гіркової горловини в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, °. Цей кут може мати знаки «+» або «-» залежно від величини кутового коефіцієнта дотичної [10]. Якщо $\beta_{\text{ваг.}j} \geq 180^\circ$, то слід використовувати формулу

$$\beta_{\text{ваг.}j} = |360 - |\beta_j - \gamma_j||. \quad (10)$$

V_{B_j} і β_j пропонують розраховувати на основі значень дійсної (a) і уявної (b) частин комплексного числа $w \leftrightarrow (a, b)$ [10]:

$$w = - \frac{\begin{vmatrix} 1 & z_0 & z_0^2 & \dots & z_0^n & w_0 \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^n & w_1 \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^n & w_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_n & z_n^2 & \dots & z_n^n & w_n \\ 1 & z & z^2 & \dots & z^n & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & z_0 & z_0^2 & \dots & z_0^n \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_n & z_n^2 & \dots & z_n^n \end{vmatrix}}, \quad (11)$$

де $z_0, z_1, z_2, \dots, z_n$ – комплексні числа. Дійсна і уявна частини цих чисел є відповідно абсцисами і ординатами розміщення n метеорологічних датчиків на полігоні [10];

$w_0, w_1, w_2, \dots, w_n$ – комплексні числа. Дійсна і уявна частини цих чисел є абсолютними величинами проекції вектора миттєвої швидкості вітру відповідно на вісь X і Y в зоні розміщення 0-го, 1-го, 2-го, ..., n -го метеорологічних датчиків [10];

z – комплексне число. Дійсна і уявна частини цього числа є абсолютними величинами проекції радіус-вектора до точки місцезнаходження j -го вагона відчепа ($x_{\text{ваг.}}, y_{\text{ваг.}}$) відповідно на вісь X і Y [10].

Отже,

$$V_{B_j} = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad (12)$$

$$\beta_j = \arctg \frac{b}{a}. \quad (13)$$

Метеорологічні датчики слід встановлювати на рівних відстанях один від одного. З розміщенням на сортувальному пристрої чотирьох датчиків інтерполяційний багаточлен має такий вигляд:

$$+ \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_1) \cdot (z - z_3)}{(z_2 - z_0) \cdot (z_2 - z_2) \cdot (z_2 - z_3)} \cdot w_2 + \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_1) \cdot (z - z_2)}{(z_3 - z_0) \cdot (z_3 - z_1) \cdot (z_3 - z_2)} \cdot w_3. \quad (14)$$

$$w = \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2) \cdot (z - z_3)}{(z_0 - z_1) \cdot (z_0 - z_2) \cdot (z_0 - z_3)} \cdot w_0 + \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_2) \cdot (z - z_3)}{(z_1 - z_0) \cdot (z_1 - z_2) \cdot (z_1 - z_3)} \cdot w_1 +$$

Отже, формулу (1) можна записати в такому вигляді:

$$V_{вих.}^{ППП} = \sqrt{V_{снів.}^2 + 2 \cdot g' \cdot (i_{СП} - \omega_0^П - \omega_{СВ}^{СП} - \omega_{кр.}^{СП} - \omega_{сн.}^{СП}) \cdot (l_{ППП-ТП} - l_{відч.}) \cdot 10^{-3}}. \quad (15)$$

Для розрахунку питомого опору від повітряного середовища і вітру, що діє на відчеп із моменту його виходу з ПГП до моменту співударання з вагонами, що знаходяться на колії сортувального парку, результуючу швидкість вітру відносно відчепа можна знайти за формулою

$$V_p^{СП} = \sqrt{V_{СП}^2 + V_{B_c}^2 + 2 \cdot V_{СП} \cdot V_{B_c} \cdot \cos \beta_{сер.}}, \quad (16)$$

де $V_{СП}$ – середня швидкість відчепа з моменту його виходу з ПГП до моменту співударання з вагонами, м/с,

$$V_{СП} = \frac{V_{вих.}^{ППП} + V_{снів.}}{2}; \quad (17)$$

V_{B_c} – середнє значення швидкості вітру, що діяв на вагони відчепа протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, м/с;

$\beta_{сер.}$ – середнє значення напрямку вітру, що діяв на вагони відчепа протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, відносно базису гіркової горловини, °.

Виходячи з формули (17), видно, що $\omega_{СВ}^{СП} = f(V_{вих.}^{ППП})$, де $V_{вих.}^{ППП}$ є параметром, який необхідно розрахувати спочатку. Від $V_{вих.}^{ППП}$ також залежить $\omega_{кр.}^{СП}$. Одним із методів розв'язання задач такого типу є метод послідовних наближень.

У цьому випадку оптимальну швидкість виходу відчепа з ПГП можна визначити з використанням такої моделі:

$$\Delta V_{снів.} = |V_{снів.}^{зад.} - V_{снів.}^{мод.}(V_{вих.}^{ППП})| \rightarrow \min, \quad (18)$$

$$0 \leq V_{вих.}^{ППП} \leq V_{вих. \max}^{ППП}, \quad (19)$$

де $\Delta V_{снів.}$ – критерій оптимізації – різниця між заданою швидкістю співударання вагонів на коліях сортувального парку ($V_{снів.}^{зад.}$) і швидкістю співударання вагонів, що отримують у результаті моделювання залежно від заданої швидкості виходу відчепа з ПГП, ($V_{снів.}^{мод.}(V_{вих.}^{ППП})$), м/с;

$V_{вих. \max}^{ППП}$ – максимальна швидкість виходу відчепа з ПГП (визначають виходячи з умови проходження відчепа без гальмування на ПГП), м/с.

$V_{снів.}^{зад.}$ можна прийняти 0,75 м/с, виходячи з того, що максимально допустима швидкість

співударення складає 1,4 м/с, а мінімальна швидкість співударення, за якої забезпечено зчеплення вагонів, – 0,1 м/с. Отже, 0,75 м/с – середнє значення в інтервалі $[0,1;1,4]$.

Швидкість співударення вагонів, що отримують у результаті моделювання, визначають за формулою

$$V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}} = \sqrt{\frac{V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}^2} - 2 \cdot g^{\text{I}} \cdot (i_{\text{СП}} - \omega_0^{\text{П}} - \omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}) - \omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}) - \omega_{\text{сн.}}^{\text{СП}})}{(l_{\text{ПГП-ТП}} - l_{\text{відч.}}) \cdot 10^{-3}}}. \quad (20)$$

Отже, цільова функція (18) набуває вигляду

$$\Delta V_{\text{спів.}} = \left| 0,75 - \sqrt{\frac{V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}^2} - 2 \cdot g^{\text{I}} \cdot (i_{\text{СП}} - \omega_0^{\text{П}} - \omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}) - \omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}) - \omega_{\text{сн.}}^{\text{СП}})}{(l_{\text{ПГП-ТП}} - l_{\text{відч.}}) \cdot 10^{-3}}} \right| \rightarrow \min. \quad (21)$$

Для оцінювання величини відхилення $V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}}$ від $V_{\text{спів.}}^{\text{зад.}}$ за різних значень $V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}$ проведено імітаційне моделювання скочування відчепів від ПГП до ТП у разі випадкових параметрів метеорологічних умов, що дає змогу відтворити умови скочування, наближені до реальних. У результаті для конкретного значення $V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}$ отримано розмиту область значень $V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}}$. У кожній такій області розраховано математичне очікування швидкості співударення вагонів $M(V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}})$, яке далі використовували для визначення $\Delta V_{\text{спів.}}$. Результати оптимізації швидкості виходу відчепів розрахункового состава з ПГП наведено в таблиці.

Ном ер відч епа	Кільк ість вагон ів у відче пі	$Q_{\text{відч}}$, т	ω_0 , Н/ кН	$V_{\text{вих.}}^{\text{ПГП}}$, м/с	$M(V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}})$, м/с	$\Delta V_{\text{спів.}}$, м/с
1	3	152, 7	1,3 4	3,0	0,65	0,10
2	2	129, 2	1,4 7	3,9	0,76	0,01
3	1	53,2	1,3 7	3,5	0,81	0,06
4	5	260, 0	0,9 7	3,6	0,63	0,12
5	14	712, 4	1,3 5	2,3	0,69	0,06
6	2	131, 6	1,1 8 _а	3,1 Т	0,77	0,02
7	1	22,0	0,6 0 _и	4,1	0,86	0,11
8	5	332, 2	1,5 6 _я	4,4	0,80	0,05
9	3	110, 1	1,6 7	5,0	0,76	0,01

Оптимальна швидкість виходу відчепів розрахункового состава з ПГП

10	2	46,4	2,1 5	5,3	0,74	0,01
11	6	348, 6	2,1 1	5,2	0,65	0,10
12	6	254, 4	1,5 8	2,9	0,82	0,07

Отже, найбільше відхилення $V_{\text{спів.}}^{\text{мод.}}$ від $V_{\text{спів.}}^{\text{зад.}}$ складає 0,12 м/с, що є прийнятним результатом. На рис. 2 як приклад наведено залежність $\Delta V_{\text{спів.}}$ від швидкості виходу восьмого відчепа з ПГП.

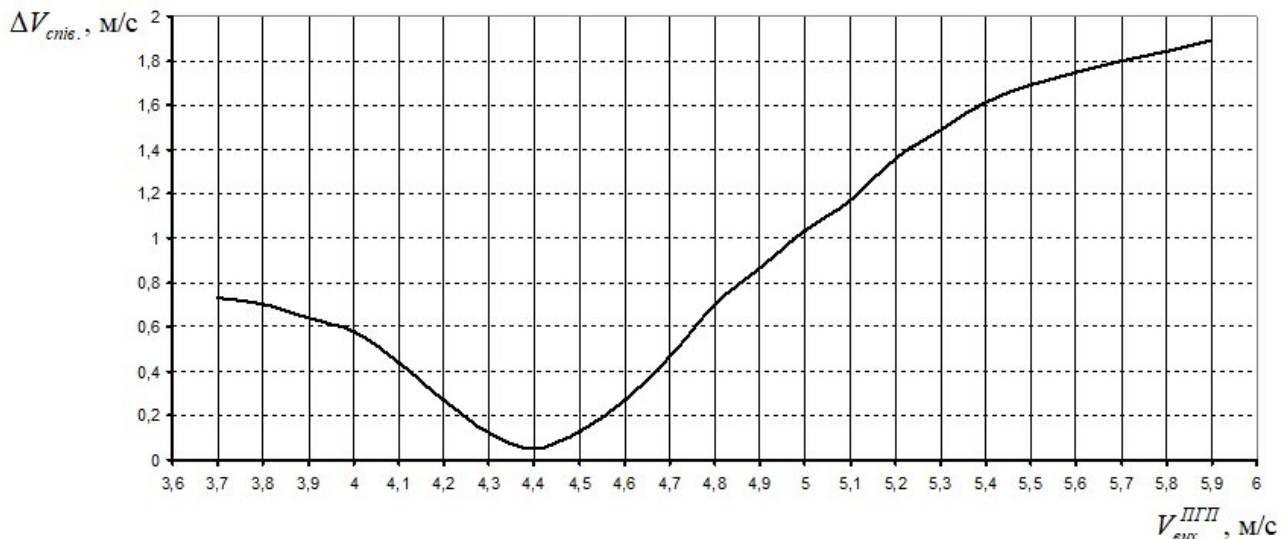


Рис. 2. Залежність різниці між заданою швидкістю співударяння вагонів на коліях сортувального парку і математичним очікуванням швидкості співударяння вагонів від швидкості виходу відчепа з ПГП

Висновки з даного дослідження і перспективи

У статті досліджено складне завдання прицільного регулювання швидкості скочування відцепів на ПГП сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням. Встановлено, що точний розрахунок швидкості виходу відцепів ускладнений наявністю значної кількості випадкових факторів, насамперед питомих опорів руху, що мають стохастичну природу.

Запропоновано метод розрахунку швидкості виходу відцепів із ПГП із використанням актуальної інформації про метеорологічні умови, параметри плану і профілю, склад відцепів і їхні миттєві параметри руху.

Уперше в контексті завдання прицільного гальмування запропоновано метод визначення приблизного значення основного питомого опору руху відчепа на основі фіксації поточних значень швидкості і напрямку вітру та визначення фактичної його швидкості з проходженням першої осі відчепа контрольних точок, що дає змогу значно підвищити точність обчислень параметрів гальмування. Для практичного застосування такого методу розроблено

структуру автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами.

За допомогою запропонованої оптимізаційної моделі можна знаходити значення швидкості виходу відчепа з ПГП, яке мінімізує відхилення від заданої швидкості співударяння з вагонами на колії призначення. Для цього використано метод послідовних наближень та імітаційне моделювання. Оптимізаційні розрахунки здійснюють з урахуванням приблизного значення основного питомого опору руху відчепа та середніх значень швидкості і напрямку вітру протягом часу руху першої осі відчепа, що обмежено моментами проходження нею першої і останньої контрольних точок.

Результати моделювання для відцепів розрахункового состава підтверджують ефективність і практичну придатність розробленого методу: максимальне відхилення швидкості співударяння від заданої не перевищує 0,12 м/с, що є допустимим у реальних умовах сортування вагонів.

Розроблений підхід може бути використаний у складі автоматизованих систем керування парковими уповільнювачами для підвищення ефективності та

безпеки роботи сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відцепів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення запропонованої структури автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами шляхом оптимізації кількості контрольних точок і відстані між ними та дослідження ефективності застосування комп'ютерного зору [11] для визначення фактичної швидкості скочування відцепів на контрольній ділянці.

Список використаних джерел

1. Ohar O., Berestov I., Kutsenko M., Smachilo J., Kogaro I. Using the new car braking systems in marshalling yards. *ICTE in Transportation and Logistics 2019: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. 2020. P. 203-210. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_27.
2. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the gravity humps / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, A. Dorosh et al. *Transport Problems*. 2016. 11(1). P. 147-155. URL: <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>.
3. Kozachenko D. M., Bobrovskiy V. I., Grevtsov C. V., Berezovyi M. I. Controlling the speed of rolling cuts in conditions of reduction of brake power of car retarders. *Science and Transport Progress*. 2021. 3(63). P. 28-40. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74710>.
4. Kozachenko D., Grevtsov S., Titova A. Determination of the Optimal Cars Exit Speeds from the Retarders on Sorting Humps. *Proceedings of 27th International Scientific Conference Transport Means 2023. Part II*. 2023. P. 966-971. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85176262755&origin=recordpage>.
5. Kozachenko D., Hermaniuk Y., Grevtsov S. The influence of random factors on the estimation of the speed and time of rolling cuts from sorting humps. *EOT-2023: MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390, 04001. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004001>.
6. Дорош А. С. Оптимізація режимів гальмування відцепів на сортувальній гірці. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро: ДНУЗТ, 2021. Вип. 22. С. 28-35.
7. Calculating Exit Speed of Rolling Cuts Based on Fuzzy Neural Networks / XU Wan-an, SHI Xuan, LIN Tong-yuan. *China Railway Science*. 2001. No. 03. P. 161-165.
8. ГБН В.2.3-37472062-1:2012. Галузеві будівельні норми України. Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування : затв. Наказом Міністерство інфраструктури України 17.01.2013 р. № 25. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2012. 112 с.
9. Бобровський В. І. Теоретичні основи вдосконалення конструкції та технології роботи залізничних станцій : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.20. Дніпропетровськ, 2002. 534 с.
10. Огар О. М. Розвиток теорії експлуатації та методів розрахунку конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20. Харків, 2011. 368 с.
11. Куценко М. Ю., Шамота А. О. Обґрунтування доцільності застосування комп'ютерного зору у технології гравітаційно-прицільного гальмування відцепів. *Матеріали XIX Міжнар. наук.-практ. конф. «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика»*, м. Харків, 1-2 червня 2023 р. Харків, 2023. С. 88-89.

Ohar O., Kutsenko M., Hurin D., Kondratiev I., Levchenko A. Development of a Method for Calculating the Exit Speed of Cuts from the Parking Retarder Position of a Sorting Device with Target Gravity Braking of Cuts.

Abstract. The complexity of the problem of targeted regulation of cuts rolling speed has been demonstrated. It has been established that the accurate calculation of this speed is complicated by the presence of numerous random factors, primarily the specific resistances to movement, which have a stochastic nature.

A method for calculating the exit speed of cuts from the parking retarder position has been proposed, utilizing up-to-date information on meteorological conditions, track alignment and profile parameters, the composition of the cuts, and their instantaneous motion characteristics.

For the first time in the context of targeted braking tasks, a method has been introduced to estimate the approximate value of the basic specific resistance to movement of a cut, based on recording real-time wind speed and direction as well as determining the actual speed of the cut during the passage of its first axle through control points. This significantly improves the accuracy of braking parameter calculations.

To enable the practical application of this method, the structure of an automated control system for park retarders has been developed.

The proposed optimization model allows for determining the exit speed of a cut from the parking retarder position that minimizes deviation from the target coupling speed with the cars on the destination track. The model employs a method of successive approximations and simulation modeling. The optimization is performed with consideration of the approximate value of the basic specific resistance to motion and the average wind speed and direction during the time interval in which the first axle of the cut travels between the initial and final control points.

The simulation results for the cuts of a test train confirm the effectiveness and practical applicability of the developed method: the maximum deviation of the coupling speed from the target value does not exceed 0.12 m/s, which is acceptable under real marshalling yard conditions.

The proposed approach can be implemented as part of automated control systems for park retarders to improve the efficiency and safety operations of a sorting device with target gravity braking of cuts.

Key words: targeted braking, speed control, cut, sorting device, retarder position, car retarder, rolling resistance.

Огар Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Куценко Максим Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного

транспорту, Харків, Україна. E-mail: kucenko@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6020-7749>.

Гурін Дмитро Олегович, кандидат технічних наук, асистент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: gurin@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3089-1217>.

Кондратьєв Ігор Вікторович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Левченко Антон Олександрович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.

Ohar Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Kutsenko Maksym, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kucenko@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6020-7749>.

Hurin Dmytro, PhD (Tech), Assistant Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: gurin@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3089-1217>.

Kondratiev Ihor, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Levchenko Anton, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.

Доктор філософії КИМАН А. М., асп. ХАРЧЕНКО Д. Р.,
канд. техн. наук ПРОХОРЧЕНКО Г. О.,
магістранти ХЛІБИШИН Б. Ю., АКОПЯН Е. Л.
(Український державний університет залізничного транспорту)

Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж

Анотація. У статті проведено мережевий аналіз пасажирської залізничної системи України за графом мережі руху швидкісних і звичайних поїздів за 2018-2019 рр. із використанням методів теорії складних мереж. Виявлено, що розподіл степенів вершин підпорядкований степеневому закону, мережа має високу централізованість, асортативність і короткий ефективний діаметр. Оцінено коефіцієнт кластеризації, транзитивність, центральність степеня, посередництва та гармонійної близькості. На основі результатів запропоновано рекомендації щодо децентралізації маршрутів, посилення зв'язності периферійних залізничних вокзалів. Проведені дослідження можуть бути використані для стратегічного і тактичного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

Ключові слова: залізнична система, макроаналіз, пасажирський поїзд, поїздопотік, мережа, розклад руху, безмасштабність, комплексні мережі.

Вступ.

Після початку російського широкомасштабного вторгнення в Україну у 2022 році залізничний транспорт виявився єдиним видом транспорту, здатним оперативно евакуювати значні обсяги пасажирів із прифронтових і тимчасово окупованих територій [1-3]. За цих умов пасажирський залізничний транспорт набув стратегічного значення в контексті реалізації транспортної стратегії розвитку пасажирської мобільності, відіграючи головну роль у забезпеченні доступу населення до безпечних регіонів, а також підтримці сталого функціонування економіки України [4].

Одними з основних нормативних документів, що регламентують функціонування пасажирських перевезень на залізницях України, є План формування пасажирських поїздів (ПФПП) і Нормативний графік руху поїздів (НГРП) [5]. Ці документи об'єднані у спеціалізоване зведення – нормативний документ за назвою «Службовий розклад руху пасажирських поїздів» (далі Службовий розклад) [6], який виданий на момент введення НГРП і визначає напрямки руху, нумерацію, регулярність курсування, а також схеми формування составів для всіх категорій пасажирських поїздів, як звичайних, так і швидкісних. Незважаючи на наявність процедур, розроблення маршрутів пасажирських поїздів і розкладів руху ґрунтується на експертних методах, що досить складно оцінити, і це, як наслідок, впливає на ефективність пасажирських перевезень.

Сучасні підходи для аналізу ПФПП не дають змогу повною мірою оцінити просторову організацію пасажиропотоків, ступінь завантаження залізничних вокзалів, взаємозалежність між станціями, а також інші основні макропараметри функціонування залізничної пасажирської мережі. Це обумовлює необхідність застосування нових дослідницьких підходів, які ґрунтуються на системному баченні об'єкта дослідження.

У зв'язку з цим перспективним є використання методів аналізу складних мереж [7, 8] для виявлення структурних властивостей транспортних систем, дослідження їхньої надійності, стійкості до збоїв, ефективності функціонування та взаємозв'язків між елементами мережі. Застосування цих методів аналізу системи пасажирських залізничних перевезень відкриває нові можливості для оптимізації маршрутної мережі, підвищення адаптивності системи перевезень і стратегічного планування в умовах воєнного і післявоєнного відновлення України.

Отже, вирішення завдання дослідження структури та властивостей системи пасажирських залізничних перевезень України на основі теорії складних мереж є актуальним і має важливе практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наукові дослідження в напрямі дослідження системи перевезень пасажирів різними видами транспорту із застосуванням методів аналізу складних мереж представлені досить широко в сучасній науковій літературі [9-12]. Загалом ці дослідження можна поділити на кілька основних напрямів.

Перший напрям пов'язаний із використанням мережевого аналізу для оцінювання ефективності та стійкості транспортних систем. У роботах [9, 11, 12] досліджено вплив топології мережі залізничних перевезень на її продуктивність і робастність. Автори використовують такі показники, як центральність вершин, модульність мережі, середня довжина шляху між вузлами та коефіцієнт кластеризації для оцінювання впливу окремих вузлів і маршрутів на загальну ефективність залізничної системи. У дослідженні [13] також зроблено акцент на аналізі впливу збоїв і затримок у мережі швидкісних пасажирських поїздів, що є особливо важливим для пасажирських перевезень, де своєчасність руху критично впливає на рівень обслуговування.

Другий напрям досліджень зосереджено на аналізі пасажирських потоків у мережах із різною швидкістю руху поїздів [14, 15]. Зокрема, у роботі [15] проведено порівняльний аналіз руху швидкісних і звичайних поїздів із використанням агентно-орієнтованого моделювання, що дає змогу більш детально враховувати поведінку пасажирів під час вибору маршруту.

Третій напрям пов'язаний з оптимізацією графіка руху поїздів і розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури з використанням мережевих моделей [16-18]. У роботі [18] запропоновано багатоцільову оптимізаційну модель розподілу пропускної спроможності міської залізничної транспортної мережі на основі багатоджерельних даних про пасажиропотік Пекінського метро. Доведено важливість аналізу сітьової структури перевезень для визначення завантаженості станцій і ліній. Однак такі дослідження не проводили для залізничної системи України.

Цікавими є дослідження, присвячені аналізу системи залізничних пасажирських перевезень України. Зокрема, у статті [19] проаналізовано перспективи впровадження швидкісного руху в Україні, урахувавши світовий досвід. Розглянуто технічні, економічні та організаційні аспекти реалізації проєктів швидкісних залізниць. Однак у цьому дослідженні недостатньо висвітлено застосування сучасних методів аналізу складних мереж для дослідження ефективності пасажирських перевезень. Загалом українські дослідження в галузі пасажирських перевезень швидкісними та звичайними поїздами дають важливу інформацію про поточний стан і перспективи розвитку залізничного транспорту [20-22]. Проте існує потреба в застосуванні методів аналізу складних мереж для дослідження залізничної системи пасажирських перевезень України, що дасть змогу більш ефективно перерозподілити навантаження на вокзали та покращити якість обслуговування пасажирів.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження просторово-структурних властивостей системи пасажирських

перевезень України швидкісними та звичайними поїздами на основі методів теорії складних мереж для виявлення закономірностей організації поїздопотоків, визначення ролі головних вокзалів і маршрутів, а також формування наукових засад удосконалення плану формування пасажирських поїздів з урахуванням підвищених мобільності населення.

Досягнення поставленої мети здійснено шляхом вирішення таких завдань дослідження:

- застосовано методи аналізу складних мереж для вивчення топологічних властивостей системи залізничних пасажирських перевезень, зокрема таких показників, як центральність, ступінь зв'язності, діаметр, ефективний діаметр, щільність, коефіцієнт кластеризації, транзитивність;

- для підтвердження масштабної інваріантності в мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів досліджено закономірності розподілу степенів вершин мережі;

- виявлено роль окремих станцій (вокзалів) мережі у формуванні маршрутної структури швидкісних і звичайних пасажирських поїздів та оцінено тенденції формування зв'язків між станціями;

- на основі отриманих результатів розробити рекомендації з оптимізації маршрутної структури, підвищення стійкості мережі та подальших напрямів дослідження, зокрема інтеграції пасажиропотоків і динамічного моделювання еволюції топології.

Викладення основного матеріалу.

Запропонований підхід для аналізу залізничної системи перевезень пасажирів базований на зображенні взаємозв'язків між залізничними станціями у вигляді графової структури, де вершинами графа є початкові і кінцеві залізничні станції за маршрутами руху пасажирських поїздів, а дугам відповідають призначення швидкісних і звичайних пасажирських поїздів відповідної категорії. Для проведення такого сітьового аналізу була використана інформація зі «Службового розкладу руху пасажирських поїздів», складеного відповідно до графіка руху за 2018-2019 рр. [6]. Для узагальнення інформації була створена база даних щодо переліку початкових і кінцевих пунктів прямування поїздів, їхніх номерів із віднесенням до категорії відповідно до класифікації [23]. Створення та візуалізація графа, проведення розрахунків виконано в середовищі Python. Побудований граф P складається з 61 вершини і 135 дуг. У табл. 1 наведено кількість сполучень мережі графа P за категоріями пасажирських поїздів. З таблиці видно чітке домінування «швидкого пасажирського» сегмента, який становить 51,9 % усіх маршрутів. Це свідчить про пріоритетне розвинення поїздів середнього рівня, що з'єднують великі міста і регіональні центри. На другому місці є «швидкісні» поїзди денного руху (IC, IC+) – 18,5 %, що відображує активне впровадження сполучень із маршрутною швидкістю відповідно від 80 та 90 км/год і більше, але ще не на рівні

абсолютного домінування. Такі поїзди є найбільш комфортними та мають сидячі місця з тривалістю руху до 6 год. Сезонні маршрути (пасажирські сезонні 5,9 % і швидкі сезонні 14,1 %) у сумі складають понад 20 % мережі, що вказує на значну адаптацію розкладу до літніх пікових потоків відпочивальників. Натомість цілорічні поїзди «пасажирський цілорічний» (4,4 %) складають малу частку, що говорить про обмежену кількість маршрутів із постійною віддачею. Така категоріальна структура мережі демонструє націленість на підвищення швидкості та якості обслуговування основних пасажирських потоків. Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів відповідно до графіка руху за 2018-2019 рр. наведено на рис. 1.

Таблиця 1

Категорії пасажирських поїздів і кількість сполучень мережі графа Р

Категорія	Кількість сполучень	Відсоток
пасажирський	6	4.4 %
швидкий	70	51.9 %
швидкісний (IC, IC+)	25	18.5 %
пасажирський сезонний	8	5.9 %
швидкий сезонний	19	14.1 %
пасажирський цілорічний	6	4.4 %
Kyiv Borispol Express	1	0.7 %
Разом	135	100 %

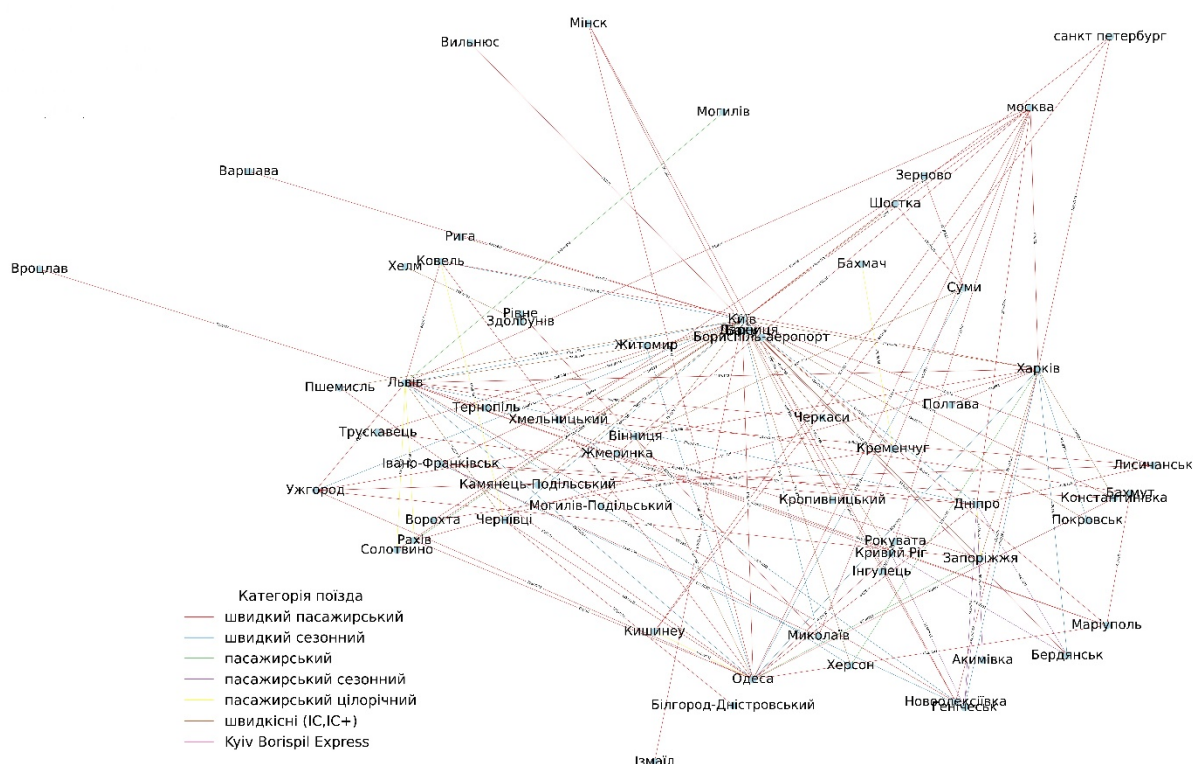


Рис. 1. Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом

На першому етапі дослідження системи перевезень пасажирів здійснено статистичне оцінювання топології графа. Основними характеристиками транспортної активності кожної станції (вокзалу) в системі перевезень прийнято

показники вхідні (In-Degree) і вихідні (Out-Degree) степені вершин графа Р. На рис. 2 наведено діаграму степенів вершин.

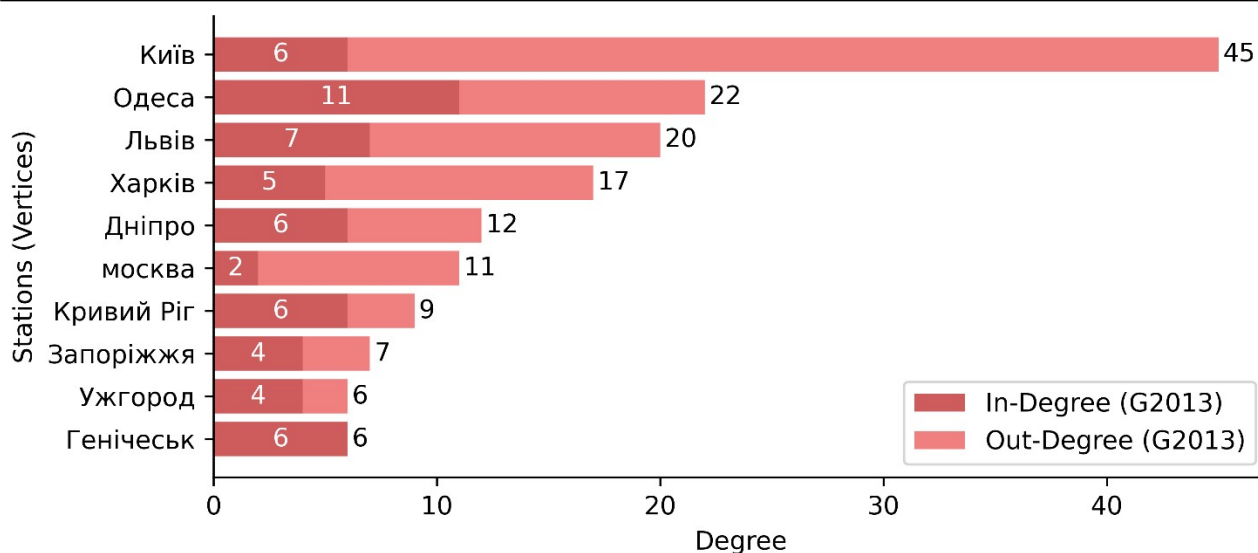


Рис. 2. Діаграма 10 найкращих залізничних вокзалів із найбільшими значеннями степенів вершин відповідно вхідних (In-Degree) і вихідних (Out-Degree)

Найвищий сумарний степінь вершини має вокзал Київ-Пасажирський (All-Degree - 45), що підтверджує його роль як головного національного залізничного хабу з переважанням вихідних маршрутів (Out-Degree - 39). Це означає, що з Києва відправляються найбільше пасажирських маршрутів. Така концентрація маршрутів свідчить про радіальну структуру мережі з надмірною залежністю від столиці. Інші високозв'язні вокзали, такі як Одеса, Львів, Харків і Дніпро, відіграють роль регіональних центрів, що забезпечують зв'язність мережі в межах Сходу, Заходу і Півдня України, виконуючи важливу роль для децентралізації пасажирських потоків. Наявність міжнародної станції підтверджує ступінь інтеграції мережі УЗ у міжнародні пасажирські перевезення, актуальні на момент складання графіка. Така станція має лише два вхідних призначення з України, але дев'ять маршрутів виходить в Україну, що може бути пов'язано зі збереженням напрямків через Київ або Харків. Такі вокзали, як Кривий Ріг,

Запоріжжя, Ужгород, Генічеськ, мають помірну роль у системі залізничних перевезень, але з помітними транспортними функціями, що пов'язані з їхнім географічним або курортним розташуванням (наприклад Генічеськ є морським курортом, Ужгород – прикордонною станцією).

Асиметрія між вхідними та вихідними степенями деяких вокзалів (особливо в Києва) свідчить про функціональну спеціалізацію вокзалів як відправних, так і приймальних центрів пасажиропотоку. Центральна роль Києва у транспортній топології робить систему вразливою до перевантажень і функціональних збоїв.

Для детального аналізу степеня центральності вершин графа мережі призначень пасажирських поїздів у дослідженні було застосовано алгоритм кластеризації K-means, який поділив значення вершин на чотири кластери відповідно для вхідного (In-degree), вихідного (Out-degree) і загального (All-degree) степеня вершин (рис. 3).

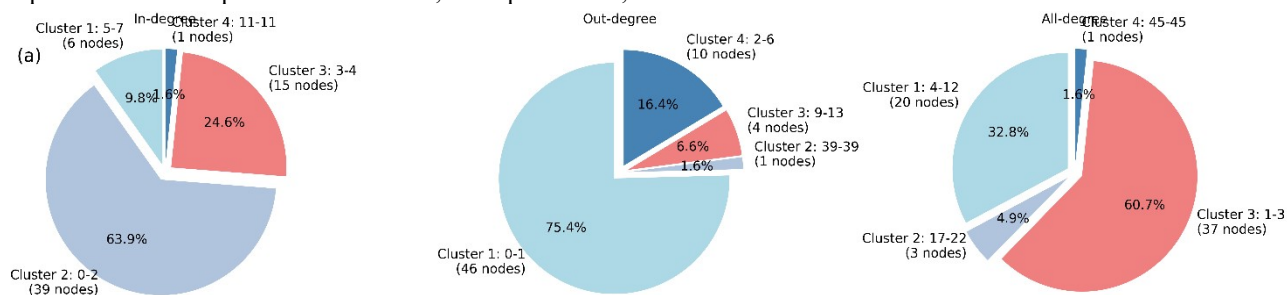


Рис. 3. Діаграма розподілу значень степеня вершин у мережі призначень ПФПП за чотирма кластерами: а – вхідний степінь (In-Degree); б – вихідний степінь (Out-Degree); в – загальний степінь (All-Degree)

Аналіз показує (рис. 3), що для вхідного степеня центральності переважає кластер 2 із найменшими значеннями (0-2), який охоплює 63,9 % вершин (39 станцій). Це свідчить про наявність значної кількості малих станцій з обмеженою

кількістю призначень пасажирських поїздів. Другим за розміром є кластер 3 (значення степенів 3-4), що містить 24,6 % станцій (15 станцій), що може свідчити про середні за значенням станції, які мають регіональне значення. Щодо вихідного степеня центральності, то переважає кластер 1 (0-1 степені), який містить 75,4 % вузлів (46 станцій). Це свідчить про значну кількість станцій, із яких відправляють лише обмежену кількість маршрутів поїздів. Наступним за значенням є кластер 4 (степені 2-6), що охоплює 16,4 % вузлів (10 станцій), які є більш значущими вузлами для відправлення поїздів. Для загального степеня центральності найбільшим за розміром є кластер 3 (степені 1-3), який займає 60,7 % вершин (37 станцій), що свідчить про домінування в мережі станцій із низькими показниками центральності. Кластер 1 (степені 4-12) включає 32,8 % вузлів (20 станцій), які відіграють важливу роль у забезпеченні пасажирського руху. Отримані результати свідчать про домінування у графі мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів станцій із низьким і середнім степенем центральності, а також

обмеженою кількістю високоев'язних вузлів. Така структура мережі може свідчити про централізованість системи, яка залежить від невеликої кількості великих станцій-хабів, що впливає на стабільність функціонування мережі та вразливість до збоїв у роботі цих вузлів.

Виявлення станцій-хабів (англ. hubs) є характерною особливістю безмасштабних мереж (free-scale networks) [24, 25]. За таких умов важливим є деталізація аналізу та перевірка відповідності емпіричного розподілу степеня вершин графа степеневому закону (power-law) [24]. Для емпіричної перевірки належності мережі призначень пасажирських поїздів до цього класу мереж було застосовано статистичні тести відповідності степеневому розподілу та експоненційному розподілу. На рис. 4 подано зіставлення емпіричних (спостережуваних) частот загальних степенів вершин із теоретично очікуваними за степеневим (power-law) та експоненційним (exponential) розподілами.

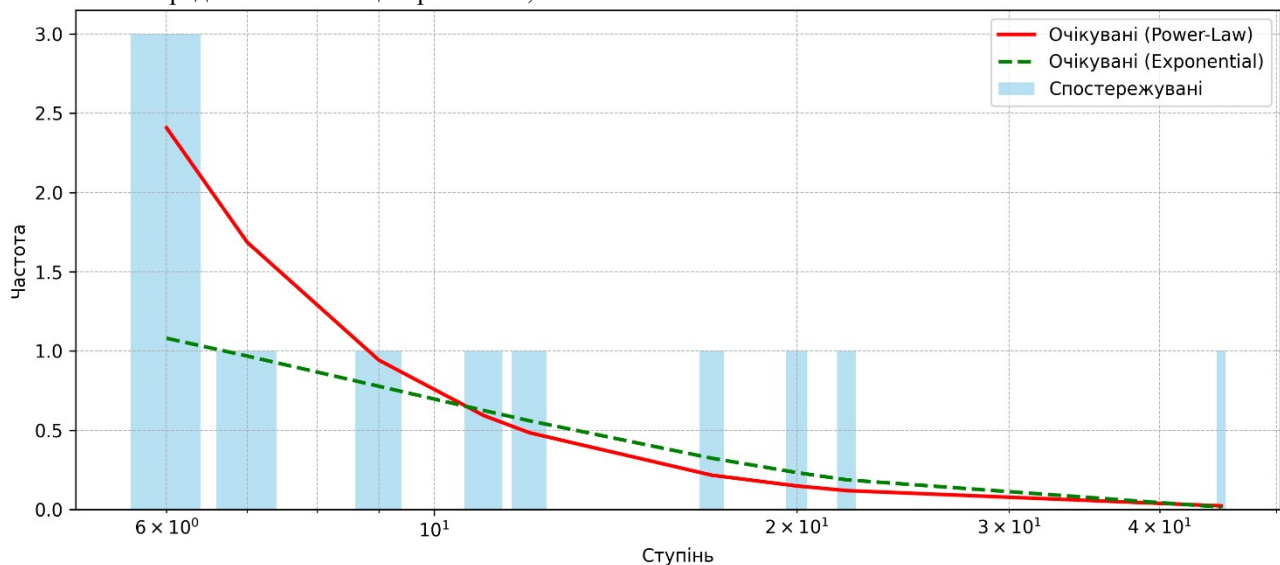


Рис. 4. Діаграма відповідності розподілів емпіричних імовірностей загальних степенів вершин графа степеневому розподілу та експоненційному розподілу

Результати показали, що значення показника степеневому розподілу (α) для загального степеня центральності становить 2,502, що відповідає типовим значенням для безмасштабних мереж ($2 < \alpha < 3$) [24]. Це підтверджує припущення про степеневий розподіл вершин. Отримане значення KS-статистики для загальних степенів у моделі power-law становить 0,068, що демонструє гарну відповідність емпіричних даних степеневому розподілу. KS-статистика для експоненційного розподілу значно більша (0,248), що підтверджує гіршу відповідність цього розподілу. Порівняння інформаційних критеріїв AIC також свідчить на користь степеневому розподілу ($AIC_{powerlaw} = 123,95$) порівняно з експоненційним

($AIC_{exponential} = 134,12$). Додатково проведено аналіз критерію R, який порівнює моделі степеневому та експоненційному закону розподілу ($R_{power_vs_exp}$). Для загальних степенів значення критерію R становить 1,726 за відповідного значення p-value = 0,084. Оскільки значення R є додатним і суттєво перевищує 1, це підтверджує, що степеневий розподіл краще описує спостережувані дані, ніж експоненційний.

З урахуванням отриманих результатів і проведених тестів можна висунути гіпотезу про належність досліджуваної мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів графа Р до класу безмасштабних мереж. Це підкреслює існування окремих центральних вузлів, які мають вирішальний

вплив на стабільність і робастність мережі, що важливо враховувати під час планування та експлуатації залізничної пасажирської системи.

Аналіз компонент зв'язності графа мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів свідчить, що граф не є ні сильно, ні слабо зв'язаним, містить 41 сильну зв'язану компоненту, із яких лише одна велика (розміром 21 вершина), а решта лише поодинокі вузли. Виявлено дві слабо зв'язані компоненти, де основна (59 вершин) та одна мала (дві вершини). Така структура мережі зумовлює суттєві обмеження у використанні традиційних показників центральності за близькістю (англ. *closeness centrality*), оскільки класична близькість не може бути коректно розрахована через неможливість досягнення ізольованих компонентів із головної компоненти. Щоб уникнути цієї проблеми, у дослідженні запропоновано використовувати показник гармонійної центральності (англ. *harmonic centrality*) [25]. На рис. 5 наведено функції кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графу Р.

За вхідною гармонійною центральністю (рис. 5, а) середнє значення дорівнює 9,80 за медіани 1,50 і

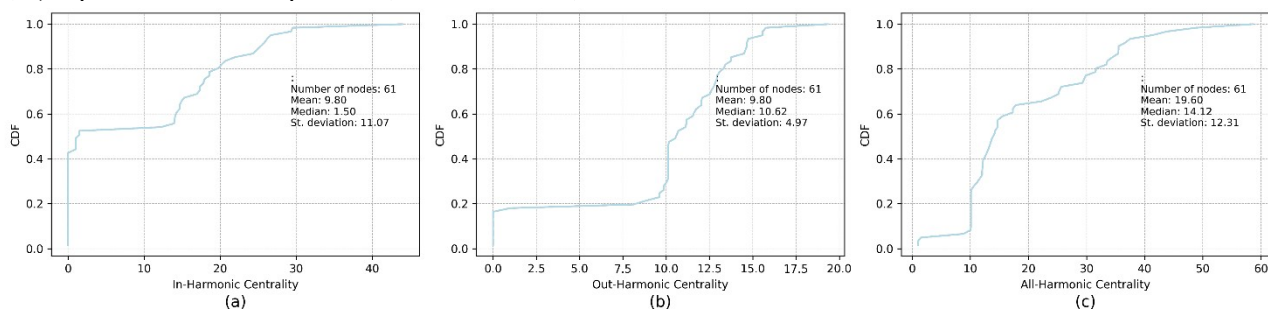


Рис. 5. Діаграма функцій кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графа Р: а – in-harmonic centrality; б – out-harmonic centrality; в – all-harmonic centrality

ієрархічності та централізованості мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів. На рис. 6 подано діаграми функцій кумулятивного розподілу (CDF) центральності за посередництвом для графа Р як для всієї мережі (рис. 6, а), так і окремо для найбільшої сильно зв'язаної компоненти (SCC) (рис. 6, б).

Аналіз центральності за посередництвом підтверджує наявність яскраво вираженої

стандартного відхилення 11,07. Значна розбіжність між середнім і медіаною свідчить про велику неоднорідність і суттєву концентрацію високих значень центральності в невеликій кількості станцій. Майже 60 % вершин мають дуже низькі значення (< 5), що вказує на слабу доступність багатьох станцій у мережі. За вихідною центральністю (рис. 5, б), середнє значення аналогічне попередньому – 9,80, але медіана суттєво вища і складає 10,62, а стандартне відхилення нижче – 4,97. Більша однорідність розподілу свідчить про більш рівномірні можливості станцій щодо досягнення інших вузлів, хоча також є група станцій із низькими показниками центральності.

За загальною центральністю (рис. 5, в) середнє значення складає 19,60, медіана відповідає 14,12, а стандартне відхилення має значення 12,31. Розподіл демонструє помірну нерівномірність, що свідчить про існування групи вузлів із високою центральністю, які ефективно зв'язують між собою окремі підмережі.

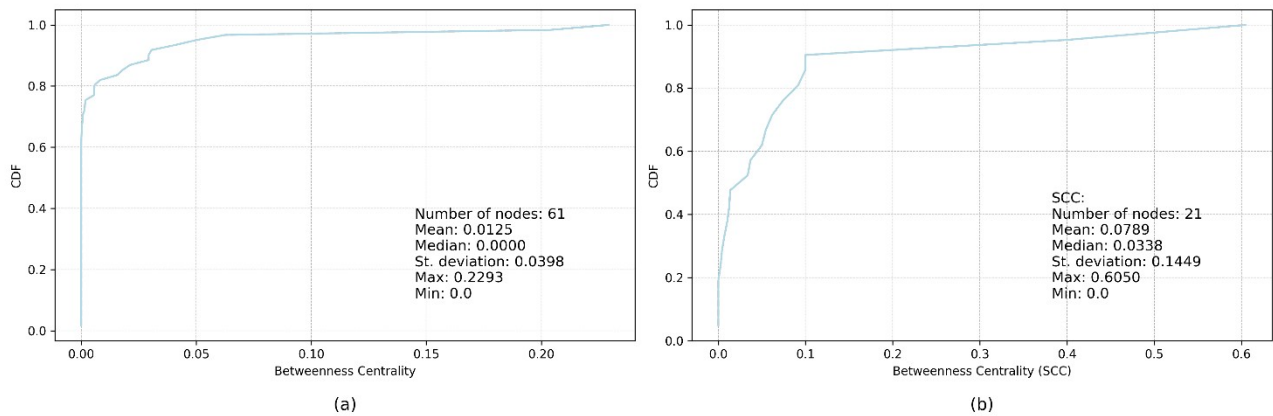


Рис. 6. Діаграма функцій кумулятивного розподілу центральності за посередництвом графа Р: а – центральність за близькістю для всієї мережі;
б – центральність за близькістю для SCC

Для вершин загального графа Р (рис. 6, а) середнє значення центральності за посередництвом по всій мережі дуже низьке, складає 0,0125, медіана дорівнює 0, стандартне відхилення складає 0,0398. Максимальне значення центральності становить 0,2293. Форма кривої CDF показує, що понад 80 % вершин мають близькі до нуля значення центральності за посередництвом. Це свідчить про те, що лише невелика кількість станцій виконує роль важливих вузлів-транзитерів, через які проходять оптимальні маршрути пасажирських поїздів у мережі. Такий розподіл вказує на високий ступінь централізованості мережі, де кілька основних вузлів забезпечують зв'язок між іншими станціями. Форма кривої CDF для SCC (рис. 6, б) демонструє, що близько 30 % вершин компоненти мають центральність за посередництвом вищу за 0,1, що означає наявність декількох критичних вузлів, які забезпечують трафік всередині компоненти і мають високу стратегічну важливість для зв'язності компонентів графа. Для найбільш сильно зв'язаної компоненти SCC середнє значення центральності суттєво вище, складає 0,0789, медіана також вища – 0,0338, а стандартне відхилення – 0,1449. Максимальне значення центральності в SCC досягає 0,6050, що є суттєво більшим порівняно із загальною мережею.

Для дослідження асортативного змішування (англ. assortative mixing), що характеризує тенденції вузлів з'єднуватися з іншими вузлами, які мають подібні значення степенів, у роботі застосовано коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа Р [27]. За значеннями табл. 2, зв'язок між вхідним і вихідним степенями (Pearson Input-Output) за коефіцієнтом Пірсона має дуже сильну статистичну значущість ($p\text{-value} = 7.10 \times 10^{-5}$), але за кореляцією Спірмена залежність відсутня. Це вказує на помірну позитивну лінійну залежність між кількістю вхідних і вихідних зв'язків вузлів. Вузли, що мають високий

ступінь вхідних зв'язків, помірно ймовірно матимуть також більше вихідних зв'язків.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа Р

Показник	Коефіцієнт кореляції	p-value
Pearson Input-Output	0.4863	7.1e-05
Spearman Input-Output	0.2325	0.0714
Pearson All-Input vs All-Output	0.7052	2.22e-10
Spearman All-Input vs All-Output	0.8348	6.22e-17
Pearson Out-All Degree	0.9624	4.19e-35
Spearman Out-All Degree	0.6586	7.99e-09

Зв'язок між загальним степенем входу і виходом (All-Input vs All-Output) за коефіцієнтом Пірсона є статистично дуже значущим результатом ($p\text{-value} = 2.22 \times 10^{-10}$). Кореляція Спірмена для цих показників ще сильніша. Це свідчить про те, що станції з високим загальним степенем мають значні як вхідні, так і вихідні поїздопотоки, що типово для центральних вузлів, які виконують роль хабів у мережі. Зв'язок між вихідним і загальним степенем (Out-All Degree) за кореляцією Пірсона надзвичайно сильна й статистично значуща залежність ($p\text{-value} = 4.19 \times 10^{-35}$). За коефіцієнтом Спірмена кореляція теж висока та значуща. Ці результати вказують, що саме вихідний ступінь є основним фактором, що визначає загальну центральність вузла. Вузли з великою кількістю вихідних зв'язків майже завжди мають великий загальний ступінь, що підтверджує їхню функцію основних точок у поширенні пасажирських поїздів у мережі.

Отже, така пасажирська залізнична мережа демонструє асортативне змішування, що свідчить про

наявність вираженої ієрархічної структури, у якій станції з високим ступенем тяжіють до з'єднання з іншими станціями аналогічного високого ступеня. Це має важливі наслідки для стабільності та стійкості мережі, оскільки в асортативних мережах видалення центральних вузлів менш драматично впливає на загальну зв'язність порівняно з дисасортативними мережами [7].

Для визначення макрохарактеристик системи залізничних пасажирських перевезень важливо розрахувати основні параметри графа Р, що наведені в табл. 3. Щільність графа (табл. 3) зі значенням 0,036885 вказує на невисоку кількість реалізованих зв'язків у мережі відносно максимально можливої [7]. Незважаючи на те, що подібні значення характерні для транспортних систем, за отриманим показником можна припустити наявність потенціалу для подальшого розширення мережі та водночас відобразити проблему ресурсних обмежень, насамперед недостатню кількість пасажирського рухомого складу у філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця».

Таблиця 3

Розрахункові параметри графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом за 2018-2019 рр.

Параметр графа	Значення
Щільність	0.036885
Діаметр	5.0
Ефективний діаметр	4.0
Кількість вершин у найбільшій сильно зв'язаній компоненті (SCC)	21.0
Середня довжина найкоротшого шляху в SCC	2.5
Коефіцієнт кластеризації Воттса-Строгаца	0.333904
Транзитивність	0.060472

Значення діаметра 5 означає, що максимальна кількість пересадок між двома будь-якими досяжними станціями не перевищує п'яти, а ефективний діаметр 4 вказує на те, що більшість пасажирських маршрутів складаються з чотири або менше пересадок. Такі значення відповідають структурним властивостям безмасштабних мереж, де маршрути між вершинами скорочені за рахунок центральних вузлів. Слід зазначити, що короткий діаметр мережі є показником її ефективної архітектури, орієнтованої на високий рівень мобільності та комфорту пасажирів, що має особливе значення в контексті конкурентоспроможності залізничного транспорту порівняно з автомобільним або авіаційним.

Середня довжина найкоротшого шляху в найбільшій компоненті SCC [7] складає 2,5 кроку і свідчить про високу доступність станцій у цій компоненті. Пасажири можуть швидко і зручно

переміщуватися між основними вузлами без значних часових витрат на пересадки. Коефіцієнт кластеризації Воттса-Строгаца [7] складає 0,333904, що є помірним. Це свідчить про наявність локальних кластерів чи регіональних підмереж, де станції формують більш щільні з'єднання. Це характерно для мереж із вираженою регіональною спеціалізацією. Водночас транзитивність графа [7] складає 0,060472, що є досить низьким значенням, що свідчить про загальну слабу структурну зв'язність станцій на макрорівні. Це підкреслює, що багато зв'язків організовані переважно за принципом «центр-периферія» через основні вузли-хаби, а не за принципом повної взаємної досяжності [27].

Отримані параметри (табл. 3) підтверджують, що досліджувана мережа має типову для транспортних систем структуру з вираженою централізацією [27], короткими шляхами між основними станціями та помірною локальною кластеризацією. Однак низький рівень транзитивності свідчить про потенційну вразливість мережі, адже виведення з ладу центральних вузлів може суттєво знизити загальну зв'язність. Для підвищення стійкості та ефективності функціонування мережі важливо посилити взаємозв'язки між периферійними станціями та розвивати додаткові альтернативні маршрути, які зменшать навантаження на центральні вузли.

Висновки.

Проведене дослідження графа пасажирських залізничних перевезень України, побудованого за Службовим розкладом руху швидкісних і звичайних поїздів на 2018-2019 рр., дало змогу виявити основні властивості функціонування залізничної пасажирської системи та сформулювати відповідні рекомендації для її подальшого розвитку. Встановлено, що розподіл степенів вершин підпорядкований степеневому закону, що свідчить про належність мережі до безмасштабних структур із властивістю масштабної інваріантності. Це підтверджено статистично (коефіцієнт $\alpha \approx 2.5$, проведено тест KS-статистика, критерій R). У мережі спостерігають яскраво виражену централізованість, де невелика кількість станцій-хабів має високі значення ступеня, посередництва та близькості, тоді як більшість вузлів є слабо зв'язаними або периферійними. Значення діаметра – 5 та ефективного діаметра – 4 свідчать про короткі шляхи між більшістю пар станцій, що є типовим для безмасштабних мереж. Визначено наявність асортативного змішування в мережі, що підтверджує тенденцію вузлів із подібними характеристиками ступеня утворювати між собою зв'язки, характерну для розвинутих транспортних структур. Ураховуючи виявлену високу централізованість мережі, одним із напрямів удосконалення залізничної пасажирської системи є поступовий перехід до більш децентралізованої конфігурації, що передбачає розширення кількості маршрутів між периферійними станціями з метою зменшення критичної залежності від центральних

вузлів. Крім того, рекомендовано підвищення зв'язності слабо інтегрованих компонент шляхом створення додаткових сполучень, що дасть змогу розширити найбільшу сильно зв'язану компоненту і покращити загальну навігацію мережі. Особливу увагу можна приділити модернізації інфраструктури найбільш зв'язних вузлів, які відіграють роль транзитних і комутаційних центрів і є критично важливими для збереження функціональності системи. У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на інтеграції пасажиропотоків у графову модель, що дасть змогу кількісно оцінити рівень навантаження на окремі вузли та виявити потенційні точки перевантаження в мережі. Перспективним напрямом також є динамічне моделювання змін топології мережі в часовому розрізі, зокрема на основі порівняння структур графів різних сезонів року (літній-зимовий), для відстеження еволюції системи під впливом зміни динаміки попиту, ресурсних обмежень і зовнішніх умов.

Запропонований напрям дослідження на основі методів аналізу складних мереж формує наукове підґрунтя для створення інструментарію стратегічного та тактичного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

Список використаних джерел

1. Головка В. Вторгнення. 2022. Широкомасштабна агресія Росії проти України /відповідальний ред. В. Смолій; НАН України. Інститут історії України. Київ: Інститут історії України, 2023. 602 с.
2. Павленко О. І., Павленко І. П. Роль залізничного транспорту в евакуації населення в період воєнних дій в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2022. Вип. 23. С. 74-78. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261658>.
3. Прохорченко А. В., Золотарьов О. Ф., Сондей О. В. Удосконалення технології роботи залізничного вокзалу в умовах організації евакуаційних поїздів. *Тези доповіді 35-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (11 листопада 2022 р., Харків). Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Вип. 3 (дод.). С. 51-52. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/12608/1/Прохорченко.pdf> (дата звернення: 15.02.2025).
4. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 19.02.2025).
5. Бутько Т. В., Константінов Д. В., Малахова О. А., Прохорченко А. В. Пасажирські перевезення (залізничний транспорт). Харків : Дім Райдер, 2014. 254 с.
6. Службовий розклад руху пасажирських поїздів, запроваджено з 09.12.2018 року. Київ: Філія «Пасажирська компанія» АТ «Українська залізниця», 2018. 703 с.
7. Wasserman S., Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, New York. 1994. 868 p.
8. Newman M. E. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Rev.* 2003. Vol. 45. P. 167-256.
9. Haznaghy A., Fi I., London A. & Németh T. Complex network analysis of public transportation networks: A comprehensive study. *Proceedings of the 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. 2015. P. 371-378.
10. Peng H., Wu L., Wei Q. The Literature Review of High-Speed Railway Network Analysis Based on Complex Network. *2024 IEEE 4th International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. Wuhan, China. 2024. P. 448-452. doi: <https://doi.org/10.1109/DTPI61353.2024.10778888>.
11. Xu Q., Mao B., Bai Y. Network structure of subway passenger flows. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2016. Vol. 3. 033404. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2016/03/033404>.
12. Hajdu L., Bota A., Kresz M., Khani A., Gardner L. M. Discovering the hidden community structure of public transportation networks. 2018. arXiv preprint arXiv:1801.03857. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.03857>.
13. Ma J., Ma S., Xie X., Gui W. Robustness Analysis of High-Speed Railway Networks Against Cascading Failures: From a Multi-Layer Network Perspective. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2024. Vol. 11(6). P. 6522-6534. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSE.2024.3451118>.
14. Dolia O. Analysis of modern scientific approaches to calculating the number of passengers on air transport. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1(3). P. 247-272. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220103.20>.
15. Kong X., Wang K., Hou M., Xia F., Karmakar G. & Li J. Exploring Human Mobility for Multi-Pattern Passenger Prediction: A Graph Learning Framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23(12). P. 23456-23467. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3148116>.
16. Yao J., Meng F., Piao X., Zhou X. Research on Cascading Failure of Complex Networks Based on Edge Weight and Capacity Allocation Strategy. In: Wang, Z., Wang, S., Xu, H. (eds) *Service Science, ICSS 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1844. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4402-6_6.
17. Di Z., Zuo H., Zhou H., Qi J., Zhang S. Integrated Optimization of Train Schedules and Transportation Plans for a Passenger-Freight Metro Line.

Sustainability. 2025. Vol. 17. 730. <https://doi.org/10.3390/su17020730>.

18. Wang B., Huang J. Xu J. Capacity optimization and allocation of an urban rail transit network based on multi-source data. *J Ambient Intell Human Comput*. 2019. Vol. 10. P. 373–383. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0599-9>.

19. Ковальов А. О., Грищенко В. О. Перспективи розвитку швидкісних пасажирських перевезень в Україні на основі світового досвіду. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 154. С. 20-24. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.154.2015.65638>.

20. Черніков В. Д., Семенов С. О., Молякова К. М. Аналіз функціонування пасажирських комплексів на залізничному транспорті. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. Вип. 1. С. 143-147. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2015_1_33.

21. Козаченко Д. М., Коробйова Р. Г., Рубець А. В. Проблеми розвитку пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2016. Вип. 12. С. 45–50. <https://doi.org/10.15802/tstt2016/85883>.

22. Руденко М. Комплексна оцінка якості наданих послуг пасажиром залізничного транспорту як стратегічний інструмент для забезпечення економічного успіху залізничних підприємств. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2024. Vol. 326(1). P. 233-246. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-38>.

23. Про затвердження Змін до Правил перевезення пасажирів, багажу, вантажобагажу та пошти залізничним транспортом України: Наказ Міністерства інфраструктури України від 01.12.2011 р. № 586, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 16.12.2011 р. за № 1463/20201. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1463-11#Text> (дата звернення: 10.01.2025).

24. Albert R. and Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*. 2002. 74 (1). P. 47–97. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47.

25. Prokhorchenko A. (2014). Investigation of scale-invariant property of organization system of train traffic volume based on the percolation theory. *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. Vol. 5 (53). P. 56-64. DOI:10.15802/stp2014/30471.

26. Marchiori M., Latora V. Harmony in the small-world. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 87(19). P. 198701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.

27. Krnc M. & Škrekovski R. Group degree centrality and centralization in networks. *Mathematics*. 2020. Vol. 8(10). P. 1810. DOI:10.3390/math8101810.

STUDY OF THE SYSTEM OF PASSENGER TRANSPORTATION BY HIGHER-SPEED AND CONVENTIONAL TRAINS BASED ON THE METHODS OF ANALYSIS OF COMPLEX NETWORKS

Ph.D. (Tech.) Andrii Kyman, PhD student Dmytro Kharchenko,

Ph.D. (Tech.) Halyna Prokhorchenko, Master's student B. Yu. Khlibyshyn, Master's student E. L. Akopyan

Abstract. In this paper, a comprehensive analysis of Ukraine's passenger rail system is conducted on the network graph of high-speed and conventional trains for 2018-2019, employing methods from complex network theory. The study aims to reveal the spatial-structural patterns governing passenger flows, to identify the role of key hub stations, and to formulate scientifically grounded recommendations for optimising the route network. Vertex degrees (in-, out- and total-degree) were clustered, and it was shown that the distribution of total degrees follows a power-law with scale-free exponent $\alpha \approx 2.5$, confirming the network's scale-free, self-similar character. The following topological macro-parameters were computed: network density 0.0369, diameter 5, effective diameter 4, Watts-Strogatz clustering coefficient 0.334 and transitivity 0.0605. Strongly and weakly connected component analyses further characterised the graph's cohesion. Node centrality was evaluated via harmonic closeness and betweenness measures, while Pearson and Spearman correlation coefficients between in-, out- and total-degrees demonstrated pronounced assortative mixing, indicative of a clear hierarchical structure. The network exhibits marked centralisation, with short path lengths between major stations and moderate local clustering. Based on these findings, we propose decentralising the route network by developing alternative links among peripheral stations, strengthening connectivity within weakly integrated components, and prioritising the modernisation of principal hub stations. These results provide a solid foundation for both strategic and tactical management of Ukraine's railway infrastructure under conditions of structural transformation and external challenges.

Keywords: railway system, macro analysis, passenger train, train flow, network, timetable, scale-free, complex networks.

Киман Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. Е-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Харченко Дмитро Романович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Прохорченко Галина Олегівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1158-3953. Тел.: +38 (066) 413-43-01. E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Акопян Еміль Левонович, магістрант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-0404-3513. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: uermp@kart.edu.ua.

Хлібишин Богдан Юрійович, магістрант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-0659-881X. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: bohdankhlibyshin@icloud.com.

Kyman Andrii Mykolaiovych, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor of the Department of Freight and Commercial Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. E-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Kharchenko Dmytro Romanovych, PhD student of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел.: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Prokhorchenko Halyna Olehivna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1158-3953. Тел.: +38 (066) 413-43-01. E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Akopyan Emil Levonovych, Master's student of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0001-0404-3513. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: uermp@kart.edu.ua.

Khlibyshyn Bohdan Yuriiovych, Master's student of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0009-0659-881X. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: bohdankhlibyshin@icloud.com.

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

Згладжування часової послідовності оцінок параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна

Анотація :Числові дані первинних вимірювань складають основу будь-якої процедури вимірювань, передавання інформації, діагностики та ін. Ці дані отримуються в суміші зі стаціонарними та імпульсними завадами. Наявність завад призводить до відхилення результатів вимірювань від їхніх істинних числових величин. Такий фактор ураховують величиною середньоквадратичного відхилення або її квадратом – дисперсією вимірювань. Дія імпульсних завад призводить до того, що дисперсії відрізняються від одного результату до іншого. З цієї причини закономірність зміни результатів вимірювань в часі може в деякі моменти спотворюватись понаднормативними відхиленнями, які, втім, не обумовлені критичним відхиленням діагностованого параметра, однак можуть бути розпізнані як такі. В роботі обґрунтовано та описано математичну процедуру, придатну для згладжування часової послідовності первинних оцінок в умовах наявності їхніх часових величин з двома дисперсіями. Згладженою закономірністю є зважена сума структурно детермінованих функцій часу. Виведено співвідношення для розрахунку сукупності вагових коефіцієнтів. Отримано вираз для розрахунку дисперсій членів згладженої послідовності.

Ключові слова: часова послідовність, первинна оцінка, вторинна оцінка, згладжування, дисперсія, структурно-детермінована функція.

Вступ

Трифазні асинхронні електродвигуни широко використовуються як тягові на електротранспорті. Найуразливішими місцями таких двигунів є обмотки їхніх статорів. Електричні параметри такої обмотки визначально впливають на технічний стан двигуна в цілому; числові величини цих параметрів є неодмінними діагностичними показниками. Методи вимірювання цих величин, ґрунтовані на подаванні на обмотку тестового сигналу з відомими формою та параметрами і в подальшому вимірюванні параметрів струмів, створених тестовими сигналами, широко застосовуються. Поруч із інформаційним тестовим сигналом на вхід вимірювального пристрою також надходять електричні завади інколи досить великої амплітуди. Їхня наявність обумовлює розкид

числових величин вимірюваних параметрів відносно їхніх істинних величин.

Це може призвести до неправильного діагностування технічного стану двигуна і потягти за собою ті чи інші технічно та економічно витратні наслідки. Тому доцільно обґрунтовано згладжувати залежності числових величин вимірюваних параметрів від часу, утримуючи ці величини в прийнятній близькості до їхніх істинних значень. Із техногенним зростанням кількості джерел завад збільшується і ймовірність діагностичних помилок з описаної вище причини. Отже, завдання отримання величин діагностичних показників обмоток з мінімізацією впливу короткочасних завадових факторів набуває великої актуальності.

Постановка проблеми й аналіз досліджень і публікацій

©АНАНЬЄВА О. М., БАБАЄВ М. М., ДАВИДЕНКО М. Г., ПАНЧЕНКО В. В., 2025

Проблема виявлення гладкої закономірності зміни в часі результатів первинних вимірювань у різних напрямках науки та техніки набуває форми питання вторинної фільтрації оцінок, виявлення тренду або згладжування даних, супроводжуваного певною термінологічною розбіжністю. У класичній роботі [1] розглянуто різні варіанти методу ковзної середньої для виявлення гладкого тренду. Корінним недоліком цих методів є неврахування можливості індивідуальної дисперсії принаймні в частині членів аналізованого часового ряду. В роботі [2] проведено порівняння відомих методів згладжування: простої ковзної середньої, зваженої ковзної середньої та експонентного зважування і зроблено висновок, що вони достатньо задовільно застосовні для часових рядів з повільною мінливістю або з постійним інтервалом між вимірюваннями. Ці два обмеження суттєво звужують сферу застосування вказаних методів. Результати роботи [3] теж базуються на даних, отриманих через рівномірні проміжки часу, а мірою якості згладжування в ній прийнята середньоквадратична похибка між обчисленою лінійною регресією та шумовим сигналом.

Обидва припущення унеможливають застосування результатів для оброблення даних з пропусками. Для отримання даних, які слабо відхиляються від прогнозованої моделі, широко використовують фільтр Калмана в різних модифікаціях [4-6]. Однак цей фільтр вимагає завеликих обчислювальних витрат для простих завдань і демонструє не завжди задовільну ефективність при нелінійних моделях поведінки об'єкта [7]. Для розв'язання проблеми нелінійності використовують частинкові фільтри [8]. Однак вони вимагають ще більших обчислювальних витрат. Ієрархічне поєднання фільтрів кількох типів забезпечує найвищу точність відслідковування об'єктів з нелінійними траєкторіями, але обчислювальні витрати дуже великі [9]. Час виконання завдання кількома типами фільтрів розглянуто в роботі [3]. Проблему визначення параметрів суттєво нелінійних залежностей розглянуто також в рамках теорії оптимального приймання структурно детермінованих сигналів [10, 11]. Але в них не врахована можливість уточнення отриманих оцінок параметрів сигналів відповідно до зміни енергетичних характеристик шумової завади між інтервалами спостереження.

Отже, на сьогодні розроблено та впроваджено чималу кількість методів фільтрації гладких траєкторій зміни в часі параметрів сигналів і матеріальних об'єктів за даними первісного вимірювання, що мають великий розкид послідовних числових значень. Але не вдалося виявити публікацій, які б описували розв'язок задачі згладжування послідовності величин первинних оцінок із врахуванням індивідуальних дисперсій цих оцінок і без вимоги до забезпечення рівномірності часового інтервалу між вказаними оцінками. Розв'язання цієї

задачі дало б змогу відслідковувати тенденції зміни діагностичних параметрів обмоток тягових електродвигунів за результатами вимірювання параметрів їхніх тестових струмів в щоразу несхожих умовах та в широкому діапазоні часових інтервалів між вимірюваннями, що дало б змогу об'єктивізувати визначення термінів технічного обслуговування.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення математично обґрунтованої процедури згладжування часової послідовності оцінок параметрів структурно детермінованого тестового сигналу за умов нерівності дисперсій оцінок й інтервалів між вимірюваннями.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано три задачі:

- 1) інтерпретація сукупності первинних даних, яка б призвела до математично конструктивного алгоритму згладжування;
- 2) виведення співвідношень для розрахунку сукупності вагових коефіцієнтів при елементарних структурно детермінованих згладжених функціях;
- 3) розрахунок дисперсій згладженої часової послідовності первинних даних.

Основна частина

Конструктивна інтерпретація сукупності первинних даних

Нехай в ході спостережень на K послідовних інтервалах часу отримано послідовність $\hat{\lambda}_k (k = 1, \dots, K)$ оцінок деякого параметра. Істинні числові величини цього параметра утворюють послідовність $\lambda_k (k = 1, \dots, K)$. Деякі з оцінок зроблено на інтервалах, уражених тільки стаціонарним шумом; вони є незалежними гаусівськими випадковими величинами з середніми значеннями λ_k та дисперсією σ_0^2 . Інші оцінки зроблено на інтервалах, додатково уражених імпульсними завадами; вони також є незалежними гаусівськими випадковими величинами з середніми λ_k та дисперсією σ_1^2 . Ймовірність ураження інтервалу імпульсною завадою дорівнює P ; в загальному випадку невідомо, які саме інтервали уражені. Введемо похибку оцінювання k -го члену послідовності оцінок:

$$n_k = \hat{\lambda}_k - \lambda_k. \quad (1)$$

З урахуванням статистичних властивостей оцінок і завад можна записати, що щільність розподілу ймовірностей похибки визначає вираз

$$p(n_k) = \frac{P}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{n_k^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{1-P}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{n_k^2}{2\sigma_0^2}} \quad (2)$$

Нехай на розширеному інтервалі спостереження істинна величина λ_k змінюється як детермінована функція дискретного часу $\lambda_k(\vec{\alpha})$, де

$$\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_m)^T \quad (3)$$

є вектором невідомих параметрів вказаної функції; T – символ векторного транспонування.

З урахуванням введених позначень можна записати вираз для щільності розподілу ймовірностей первинних оцінок $\hat{\lambda}_k$ як

$$p(\hat{\lambda}_k | \vec{\alpha}) = \frac{P}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\hat{\lambda}_k - \lambda_k(\vec{\alpha})]^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{1-P}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\hat{\lambda}_k - \lambda_k(\vec{\alpha})]^2}{2\sigma_0^2}} \quad (4)$$

Числовим рядом, що згладжує послідовність первинних оцінок $\lambda_k (k=1, \dots, K)$, є

$$\lambda_k^* \left(\vec{\alpha} \right) (k=1, \dots, K), \text{ побудована на базі оцінки}$$

$\vec{\alpha}^*$ вектора невідомих коефіцієнтів відомої функції $\lambda_k(\vec{\alpha})$.

Функцією правдоподібності реалізації $\hat{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$ первинних оцінок є

$$p(\hat{\lambda} | \vec{\alpha}) = \prod_{k=1}^K p(\hat{\lambda}_k | \vec{\alpha}). \quad (5)$$

Безпосередня підстановка виразу (4) до цього добутку і подальший пошук максимуму по $\vec{\alpha}$ отриманої функції приводить до необхідності розв'язування системи суттєво нелінійних рівнянь, що являє собою обчислювально обсяжну задачу, яка на сьогодні не має відповідної математичної та апаратної підтримки. Тобто розглянута задача згладжування в формулюванні, базованому на припущенні про невідомість номерів членів послідовності первинних оцінок, уражених імпульсною завадою, має розв'язок, лише потенційно доступний до практичної реалізації. Відтак це формулювання не є конструктивним.

З'ясуємо, чи призведе до практично придатних наслідків знання номерів членів (в подальшому – позицій) послідовності, уражених імпульсною

завадою. Така інформація доступна, наприклад, в пристрої, описаному в роботі [11]. Вважатимемо, що з K позицій розглянутої послідовності K_0 не уражені імпульсною завадою, а K_1 уражені. Розділимо повну послідовність з K позиціями на «неуражену»

послідовність $\hat{\lambda}_{0i}$, де номер i належить множині K_0 номерів неуражених оцінок об'ємом K_0 , та на «уражену» послідовність $\hat{\lambda}_{1i}$, де номер i належить множині K_1 номерів уражених оцінок об'ємом K_1 , причому $K_0 + K_1 = K$. Функція правдоподібності всієї реалізації $\hat{\lambda}$ все так же визначається виразом (5), але добуток в правій частині тепер розділяється на два піддобутки згідно з описаними множинами:

$$p(\hat{\lambda} | \vec{\alpha}) = \prod_{K_0} p(\hat{\lambda}_{0i} | \vec{\alpha}) \cdot \prod_{K_1} p(\hat{\lambda}_{1i} | \vec{\alpha}). \quad (6)$$

Кожен з елементарних співмножників згідно з їхніми описаними вище статистичними характеристиками визначається гаусівською щільністю розподілу ймовірностей, тож маємо, що

$$p(\hat{\lambda} | \vec{\alpha}) = \prod_{K_0} \left\{ \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\hat{\lambda}_{0i} - \lambda_{0i}(\vec{\alpha})]^2}{2\sigma_0^2}} \right\} \times \prod_{K_1} \left\{ \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\hat{\lambda}_{1i} - \lambda_{1i}(\vec{\alpha})]^2}{2\sigma_1^2}} \right\}, \quad (7)$$

де $\lambda_{0i}(\vec{\alpha})$ та $\lambda_{1i}(\vec{\alpha})$ – відліки визначеної вище детермінованої функції часу на позиціях, що належать відповідно множинам K_0 та K_1 . За методом оцінювання за максимумом правдоподібності оцінка $\vec{\alpha}^*$ вектора $\vec{\alpha}$ має забезпечити максимум функції (7). Логарифмування цього виразу і подальше виключення доданків, які не залежать від $\vec{\alpha}$, призводить до такої цільової функції:

$$Y(\vec{\alpha}) = \frac{1}{\sigma_0^2} \left\{ 2 \sum_{K_0} \hat{\lambda}_{0i} \cdot \lambda_{0i}(\vec{\alpha}) - \sum_{K_0} \lambda_{0i}^2(\vec{\alpha}) \right\} +$$

$$+ \frac{1}{\sigma_1^2} \left\{ \sum_{\mathcal{K}_1} \hat{\lambda}_{1i} \cdot \lambda_{1i}(\vec{\alpha}) - \sum_{\mathcal{K}_1} \lambda_{1i}^2(\vec{\alpha}) \right\}. \quad (8)$$

Можливість практичної максимізації цієї функції не обтяжується загальноструктурними нелінійностями, а визначається лише видом детермінованої функції $\lambda_i(\vec{\alpha})$ дискретного часу та вектора параметрів $\vec{\alpha}$. Вибір цього виду залишається за користувачем.

Розрахунок вагових коефіцієнтів при елементарних згладжених функціях

Прийmemo, що послідовність $\lambda_i(\vec{\alpha})$ на множині позицій, що йдуть підряд, (тобто без розбиття на множини номерів K_0 та K_1) формується як

$$\lambda_i(\vec{\alpha}) = \sum_{m=1}^M \alpha_m F_{mi}, \quad i = 1, \dots, K, \quad (9)$$

де $F_{mi} = F_m(t_i)$ – відомі функції часу, зафіксовані в моменти часу t_i ;

α_m – невідомі вагові коефіцієнти.

У матричній формі рівність (9) можна записати як

$$\vec{\lambda} = \vec{\alpha}^T \vec{F}, \quad (10)$$

де $\vec{\alpha}$ – вектор вагових коефіцієнтів;

$\vec{F}$ – матриця $\|F_{mi}\|$, що складена з числових значень вказаних відомих функцій часу.

Відповідно до групування відліків часу в множини K_0 та K_1 цю матрицю можна фрагментувати на підматриці $\vec{F}_0 = \|F_{mi}\| (i \in \mathcal{K}_0)$ та $\vec{F}_1 = \|F_{mi}\| (i \in \mathcal{K}_1)$. Аналогічній фрагментації можна піддати вектор $\vec{\lambda}$, визначений на всіх K позиціях, утворивши підвектори $\vec{\lambda}_0$ (складений на неуразжених позиціях) та $\vec{\lambda}_1$ (складений на уражених позиціях). Відповідно може бути фрагментовано вектор $\hat{\lambda}$ первинних оцінок на $\hat{\lambda}_0$ та $\hat{\lambda}_1$. Це дає змогу записати вираз (8) у матричній формі як

$$Y(\vec{\alpha}) = \frac{1}{\sigma_0^2} \left(2\vec{\alpha}^T \vec{F}_0 \hat{\lambda}_0 - \vec{\alpha}^T \vec{\psi}_0 \vec{\alpha} \right) + \frac{1}{\sigma_1^2} \left(2\vec{\alpha}^T \vec{F}_1 \hat{\lambda}_1 - \vec{\alpha}^T \vec{\psi}_1 \vec{\alpha} \right), \quad (11)$$

де

$$\vec{\psi}_0 = \vec{F}_0 \cdot \vec{F}_0^T, \quad (12)$$

$$\vec{\psi}_1 = \vec{F}_1 \cdot \vec{F}_1^T. \quad (13)$$

Рівняння для визначення оцінки $\vec{\alpha}^*$ отримаємо, взявши від виразу (11) похідну за вектором $\vec{\alpha}$ та прирівнявши її до нуля:

$$\frac{dY(\vec{\alpha})}{d\vec{\alpha}} = \frac{1}{\sigma_0^2} \left(2\vec{F}_0 \hat{\lambda}_0 - 2\vec{\psi}_0 \vec{\alpha} \right) + \frac{1}{\sigma_1^2} \left(2\vec{F}_1 \hat{\lambda}_1 - 2\vec{\psi}_1 \vec{\alpha} \right) = 0.$$

Звідси

$$\vec{\alpha}^* = \left(\frac{1}{\sigma_0^2} \vec{\psi}_0 + \frac{1}{\sigma_1^2} \vec{\psi}_1 \right)^{-1} \left(\frac{1}{\sigma_0^2} \vec{F}_0 \hat{\lambda}_0 + \frac{1}{\sigma_1^2} \vec{F}_1 \hat{\lambda}_1 \right) \quad (14)$$

Цей вираз визначає сукупність оцінок вагових коефіцієнтів при елементарних згладжувальних функціях. Водночас ніде не накладено вимог до рівномірності часового інтервалу між первинними оцінками.

Розрахунок дисперсій членів згладженої часової послідовності

Згладжена часова послідовність (послідовність вторинних оцінок) обчислюється як компоненти вектора

$$\vec{\lambda}^* = \vec{F}^T \vec{\alpha}^*. \quad (15)$$

Коваріаційна матриця вторинних оцінок визначається виразом

$$\vec{K}_{\lambda^*} = E \left\{ \left(\vec{\lambda}^* - \vec{\lambda} \right) \left(\vec{\lambda}^* - \vec{\lambda} \right)^T \right\} =$$

$$\begin{aligned}
&= E \left\{ \left(\bar{F}^T \hat{\bar{\alpha}} - \bar{F}^T \bar{\alpha} \right) \cdot \left(\bar{F}^T \hat{\bar{\alpha}} - \bar{F}^T \bar{\alpha} \right)^T \right\} = \\
&= E \left\{ \bar{F}^T \left(\hat{\bar{\alpha}} - \bar{\alpha} \right) \left(\hat{\bar{\alpha}} - \bar{\alpha} \right)^T \bar{F} \right\} = \\
&= \bar{F}^T E \left\{ \left(\hat{\bar{\alpha}} - \bar{\alpha} \right) \left(\hat{\bar{\alpha}} - \bar{\alpha} \right)^T \right\} \bar{F} = \bar{F}^T \cdot \bar{K}_{\alpha} \cdot \bar{F}, (16)
\end{aligned}$$

де $E \{ \dots \}$ – символ математичного очікування;

$\bar{K}_{\alpha}$ – коваріаційна матриця $(m \times m)$ оцінок вагових коефіцієнтів.

Для визначення цієї останньої матриці скористаємось тим, що компоненти векторів $\hat{\lambda}_0$ та $\hat{\lambda}_1$ незалежні як між собою, так і між цими векторами. Також введемо для скорочення запису матрицю

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\sigma_0^2} \bar{\psi}_0 + \frac{1}{\sigma_1^2} \bar{\psi}_1. \quad (17)$$

Тоді

$$\hat{\bar{\alpha}} = \bar{\Phi}^{-1} \left(\frac{1}{\sigma_0^2} \bar{F}_0 \hat{\lambda}_0 + \frac{1}{\sigma_1^2} \bar{F}_1 \hat{\lambda}_1 \right). \quad (18)$$

Оскільки доданки цієї формули статистично незалежні, то коваріаційна матриця вектора $\hat{\bar{\alpha}}$ є сумою коваріаційних матриць цих доданків. Для першого доданка

$$\begin{aligned}
\bar{K}_{\alpha 0} &= \frac{1}{\sigma_0^4} \bar{\Phi}^{-1} E \left[\bar{F}_0 \left(\hat{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_0 \right) \left(\hat{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_0 \right)^T \bar{F}_0^T \right] \bar{\Phi}^{-1} = \\
&= \frac{1}{\sigma_0^4} \bar{\Phi}^{-1} \bar{F}_0 \bar{K}_{\lambda_0} \bar{F}_0^T \left(\bar{\Phi}^{-1} \right)^T, \quad (19)
\end{aligned}$$

де $\bar{K}_{\lambda_0}$ – коваріаційна матриця первинних оцінок, що містяться в множині K_0 .

Аналогічно для другого доданка

$$K_{\alpha 1} = \frac{1}{\sigma_1^4} \bar{\Phi}^{-1} \bar{F}_1 \bar{K}_{\lambda_1} \bar{F}_1^T \left(\bar{\Phi}^{-1} \right)^T, \quad (20)$$

де $\bar{K}_{\lambda_1}$ – коваріаційна матриця первинних оцінок, що містяться в множині K_1 .

Отже,

$$\bar{K}_{\alpha} = \bar{K}_{\alpha 0} + \bar{K}_{\alpha 1}. \quad (21)$$

Підставивши цей вираз до співвідношення (16), отримаємо, що

$$\bar{K}_{\lambda*} = \bar{F}^T \left(\bar{K}_{\alpha 0} + \bar{K}_{\alpha 1} \right) \bar{F}. \quad (22)$$

З огляду на статистичну незалежність членів послідовності первинних оцінок матриці $\bar{K}_{\lambda_0}$ та $\bar{K}_{\lambda_1}$ є діагональними:

$$\begin{aligned}
\bar{K}_{\lambda_0} &= \sigma_0^2 \bar{I}, \\
\bar{K}_{\lambda_1} &= \sigma_1^2 \bar{I},
\end{aligned} \quad (23)$$

де $\bar{I}$ – одинична матриця.

У результаті цього коваріаційна матриця вторинних оцінок визначається виразом

$$\bar{K}_{\lambda*} = \bar{F}^T \left[\frac{1}{\sigma_0^2} \bar{\Phi}^{-1} \bar{F}_0 \bar{F}_0^T \left(\bar{\Phi}^{-1} \right)^T + \frac{1}{\sigma_1^2} \bar{\Phi}^{-1} \bar{F}_1 \bar{F}_1^T \left(\bar{\Phi}^{-1} \right)^T \right] \bar{F} \quad (24)$$

в якому матриця $\bar{\Phi}$ визначена співвідношенням (17).

Дисперсія i -тої вторинної оцінки є елементом K_{ii} коваріаційної матриці вторинних оцінок.

Висновки

Розглянуте питання відноситься до сукупності методів та засобів уточнення первинних оцінок параметрів коливань в пристроях діагностики, електропостачання та передавання інформації. В цій роботі отримано математично обґрунтовану процедуру згладжування послідовності таких оцінок, яка придатна в досі нерозглянутих умовах нерівності їхніх дисперсій та можливої непостійності часових інтервалів між ними. Результати роботи дають змогу розширити коло вимірювальних робіт, в яких потрібне уточнення первинних вимірювань та підвищити точність відтворення закономірностей зміни вимірюваних параметрів у часі, що необхідно з

метою упереджувального діагностування. Задачею наступних досліджень є врахування можливого часового дрейфу дисперсії первинних вимірювань.

Список використаних джерел

- Kendall M. G., Ord J. K. Time series. Oxford University Press. New York. 1990. 312 p. URL : <https://document.pub/time-series.html>.
- Дослідження методів згладжування часових рядів при обробці навігаційних даних руху судна / І. В. Трофименко, В. М. Іваненко, В. М. Федунів, З. Я. Дорофєєва. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 34 (73), № 2. 2023. С. 209-214. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/35>.
- Kowalski P., Smyk P. Review and comparison of smoothing algorithms for one-dimensional data noise reduction. 2018 *International Interdisciplinary PHD Workshop (IIPHDW)*, Swinoujscie, Poland, 2018. Pp. 277-281. DOI <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388373>.
- Nonlinear Bayesian Estimation: From Kalman Filtering to a Broader Horizon / H. Fang, N. Tian, Y. Wang, M. Zhou, M. Hail. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. Vol. 5. No 2. March 2018. P. 401-417. DOI <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510808>.
- Konatowski S., Kaniewski P., Matoszewski J. Comparison of Estimation Accuracy of EKF, UKF and PF Filters. *Annual of Navigation*. 2016. № 23. P. 69-86. DOI <https://doi.org/10.1515/aon-2016-0005>.
- Salhi A., Ghazzi F., Fakhfakh A., Estimation for Motion in Tracking and Detection Objects with Kalman Filter / From the Edited Volume "Dynamics Data Assimilation – Beating the Uncertainties"/ Edited by Dinesh G. Harkut. 2020. DOI <https://doi.org/10.5772/intechopen.92863>.
- Yousefi S. M., Mohseni S. S., Dehbovid H., Ghaderi R. A Practical Approach to Tracking Estimation Using Object Trajectory Linearization *International Journal of Computational Intelligence System*. 2024. 17:175. DOI <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00579-5>.
- Implicit Particle Filtering via a Bank of Nonlinear Kalman Filters / I. Ascari, M. A. Haile, X. Tu, H. Fang. *arXiv: 2025.04521v [eess. SY]* 9 May 2022. DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.04521>.
- High-Precision Localization Tracking and Motion State Estimation on Ground-Based Moving Target Utilizing Unmanned Aerial Vehicle High-Altitude Reconnaissance / X. Zhou, W. Jia, R. He, W. Sun. *Remote Sensing*. 2025. 17. 735. DOI <https://doi.org/10.3390/rs17050735>.
- Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference / S. Panchenko at all. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. № 9 (111). P. 94-102. DOI <https://doi.org/10.15587/1729-4061.235835>.
- Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою / О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв, М. Г. Давиденко, В. В. Панченко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 25-32. DOI <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>.

Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V.

Smoothing of the time sequence of parameter estimates of the stator winding testing signal of a three-phase induction motor

Abstract. Numerical data of primary measurements form the basis of any measurement procedure, information transmission, diagnostics, etc. These data are obtained in a mixture with stationary and impulse interference. The presence of interference leads to deviation of measurement results from their true numerical values. This factor is taken into account by the value of the standard deviation or its square – the dispersion of measurements. The presence of impulse noise leads to the fact that the dispersions differ from one result to another. For this reason, the pattern of changes in measurement results over time may at some points be distorted by abnormal deviations, which, however, are not due to a critical deviation of the diagnosed parameter, but can be recognized as such. Therefore, it is important to prevent the occurrence of too large a diagnostically unjustified difference between the numerical measurement result and the exact value. In doing so, it is desirable to adhere to the broadest possible assumptions regarding the probabilistic characteristics of such deviations. But a currently feasible compromise should be established between the breadth of these assumptions and the resulting requirements for the algorithmic and hardware complexity of the implementation. The paper substantiates and describes a mathematical procedure suitable for smoothing the time sequence of primary estimates in the presence of their time values with two possible variances. The variance of the value of each estimate is considered known. The time interval between the moments of obtaining estimates is not necessarily uniform. The smoothed pattern (the set of secondary estimates of the measurement results expanded in discrete time) is the weighted sum of structurally determined time functions. No conditions are imposed on the specific type of such functions. A relation is derived for calculating the set of weight coefficients. A mathematical relationship is found between the covariance matrix of these weight coefficients and the covariance matrix of the vector of secondary estimates. An expression for calculating the variances of the members of a smoothed sequence is obtained.

Key words: time series, primary estimate, secondary estimate, smoothing, dispersion, structurally determined function.

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

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

Давиденко Михайло Георгійович, к.т.н., доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: davdenk@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>.

Панченко Владислав Вадимович, к.т.н., доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

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

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

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

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

Магістранти КУЩ М. Ю.,
АББАСОВ О. О.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення розумного нічника із світло-звуковою модуляцією

Анотація: Робота присвячена створенню інноваційного розумного нічника, що використовує світло-звукову модуляцію для покращення сну та релаксації. Дослідження аналізує вплив акустичних стимулів (білий, рожевий, коричневий шуми, природні звуки, емоційна музика) і світлових параметрів (колір, інтенсивність, пульсація) на людину. Пристрій інтегрує адаптивні алгоритми, регулюючи освітлення та звук відповідно до часу, стану користувача і його переваг. Розроблення включало апаратну частину для модуляції та програмну – вбудоване ПЗ і мобільний додаток. Експерименти підтвердили значне покращення якості сну: скорочення латентності, збільшення тривалості та глибини сну, зменшення пробуджень і зниження частоти серцевих скорочень.

Ключові слова: розумний нічник, світло-звукова модуляція, якість сну, релаксація.

Вступ

В умовах сучасних технологічних змін і зростання рівня стресових факторів проблема підтримання фізичного та психічного здоров'я набуває особливої актуальності. Прискорення темпу життя, спричинене глобалізацією та інформаційним тиском, ставить перед науковою спільнотою завдання з розроблення ефективних методів збереження здоров'я населення. У цьому контексті створення інноваційних підходів для забезпечення якісного відпочинку та релаксації стає пріоритетним напрямом наукових досліджень. Формування комфортних умов для відновлення організму сприяє підвищенню працездатності та загального рівня життя, що свідчить про значущість цієї проблеми для сучасної науки та інженерної практики.

Повноцінний сон та ефективне розслаблення є фундаментальними складовими фізичного і психологічного здоров'я індивіда. Сон відіграє центральну роль у відновленні енергетичного балансу організму. Протягом сну відбувається оптимізація гормональних процесів, включно із синтезом мелатоніну, відповідального за регуляцію біологічних ритмів. Крім того, сон позитивно впливає на функціонування імунної системи, когнітивні функції, такі як пам'ять і увага, а також стимулює процеси регенерації тканин. Релаксація також є критично важливою для здоров'я. Вона сприяє зниженню концентрації кортизолу – гормону, асоційованого зі стресом, який має негативний вплив на серцево-судинну та нервову системи.

М'язове розслаблення і нормалізація дихальних патернів під час релаксації оптимізують кровообіг і покращують оксигенацію тканин. Додатково релаксаційні практики сприяють підвищенню концентрації, зниженню рівня тривожності, стабілізації психоемоційного фону. Недостатня тривалість сну або відсутність можливостей для якісної релаксації можуть призвести до значних негативних наслідків для здоров'я. Хронічний дефіцит сну асоціюють зі збільшеним ризиком виникнення серцево-судинних патологій, цукрового діабету, ожиріння та депресивних розладів. Тривалий стрес може спричинити дисфункції нервової системи, погіршення когнітивних здібностей та емоційну лабільність [1–9].

Світлові та звукові стимули є важливими факторами у формуванні оптимального середовища для ініціації сну, підтримання його якості та досягнення стану релаксації. Ці стимули модулюють фізіологічні процеси, сприяючи регуляції біоритмів, покращенню психоемоційного стану та підвищенню загального рівня комфорту. Світло є основним екзогенним синхронізатором циркадних ритмів. Спектральні характеристики та інтенсивність світлового потоку впливають на продукцію мелатоніну [10]. Наприклад, світло теплого спектра (жовті та червоні відтінки) сприяє розслабленню, імітуючи природне вечірнє освітлення, що готує організм до відпочинку. Навпаки, холодне біле світло підвищує рівень бадьорості, тому його доцільно застосовувати для полегшення пробудження. Частота модуляції світла також має значення: неякісне мерехтливе освітлення може викликати зоровий дискомфорт і почуття занепокоєння, тоді як стабільне або ритмічно пульсуюче світло сприяє створенню спокійної атмосфери [11].

Звук є другим значущим фактором, що впливає на процеси релаксації та засинання. Наукові дані свідчать, що широкосмугові шуми, такі як білий або рожевий шум, а також природні звуки (наприклад шум дощу, морських хвиль, лісу) ефективно маскують зовнішні акустичні подразники, формуючи сприятливий для розслаблення звуковий фон [12]. Крім того, музичні композиції з повільним темпом і низькочастотним діапазоном здатні знижувати частоту серцевих скорочень і стимулювати альфа-активність мозку, що корелює зі станом спокою [13]. Комбінований вплив світлових і звукових стимулів продемонстрував свою ефективність у створенні заспокійливого середовища [14]. Наприклад, поєднання теплого освітлення з природними звуками або музикою підсилює релаксацийний ефект, забезпечуючи комфортні умови для сну. Це не тільки полегшує процес засинання, але й сприяє глибшому та більш відновлювальному сну, що є важливим для загального фізіологічного та психологічного благополуччя.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр технологічних засобів, спрямованих на покращення якості сну і створення комфортної атмосфери, виділяючи пристрої, що використовують світлові та звукові впливи. Світлотехнічні рішення включають нічні світильники, лампи з можливістю регулювання колірної температури світла і світлодіодні панелі, які імітують природний цикл зміни освітленості. Їхнє основне призначення полягає у впливі на циркадні ритми для гармонізації циклу «сон-безсоння». Проте такі пристрої часто мають обмежений набір фіксованих налаштувань і не враховують індивідуальні особливості користувачів, такі як адаптація до змін у навколишньому середовищі або специфічні фізіологічні потреби. Аудіопристрої, що генерують фонові звуки (білий або рожевий шум, звуки природи, мелодії), використовують для зменшення рівня тривожності, поліпшення концентрації уваги і створення акустично комфортних умов для засинання. Актуальні дослідження підтверджують позитивний вплив таких звукових рішень на сон, однак наголошують на важливості індивідуалізованого підходу.

Загалом сучасні пристрої мають певні недоліки, зокрема недостатню адаптивність до динамічних змін умов, низький ступінь персоналізації налаштувань і відсутність комплексного підходу щодо впливу на сон шляхом поєднання світлових і звукових стимулів. Більшість рішень орієнтовані на виконання вузькоспеціалізованих завдань, не забезпечуючи інтегрованого впливу на фізіологічний і психологічний стан користувача. Окрім того, відсутність науково обґрунтованих алгоритмів, що враховують індивідуальні потреби, і недостатня інтеграція різних аспектів стимуляції суттєво обмежують ефективність таких пристроїв.

Розроблення нових технологічних рішень передбачає створення інтегрованого пристрою, що поєднає світлові та звукові функції, базуючись на сучасних уявленнях про фізіологію сну і вплив зовнішніх факторів на організм людини. Перспективним напрямом досліджень є включення адаптивних алгоритмів, здатних автоматично корегувати параметри роботи пристрою залежно від часу доби, стану користувача або умов навколишнього середовища. Такий пристрій може бути використаний для поглибленого вивчення взаємодії світлових і звукових стимулів із біоритмами людини, відкриваючи нові можливості для оптимізації якості сну та процесів релаксації.

Дослідження впливу світлових та акустичних стимулів

Акустична стимуляція є значущим екзогенним фактором, здатним модулювати психофізіологічний стан індивіда, зокрема впливати на процеси сну та релаксації. Різні звукові сигнали можуть індукувати широкий діапазон реакцій, від активації мозкової діяльності до заспокоєння та синхронізації біологічних ритмів. Характер впливу акустичних стимулів визначений їхніми фізичними параметрами, такими як частотний спектр, інтенсивність, ритмічна структура, а також особливостями їх сприйняття слуховою системою.

Світлові стимули також відіграють суттєву роль у регуляції фізіологічних функцій, особливо в контексті циркадної ритміки та сну. Світло є одним із первинних зовнішніх синхронізаторів біологічного годинника людини. Неадекватне освітлення, його нестача або надлишок, може спричиняти порушення сну та фізіологічного балансу. Спектральний склад світла, його інтенсивність і частота мерехтіння є важливими характеристиками, що можуть впливати на ступінь релаксації та готовність до сну.

Проте для об'єктивного аналізу впливу акустичних і світлових сигналів на організм людини необхідна чітка систематизація підходів для їх класифікації. Відсутність структурованого поділу призводить до фрагментарності досліджень та ускладнює формулювання однозначних висновків щодо природи та специфіки впливу окремих звукових і світлових стимулів. Упровадження чіткої класифікаційної системи дає змогу врахувати різноманітність ефектів аудіовізуальної стимуляції, що є критично важливим для аналізу як ізольованих характеристик звуку та світла, так і їхньої синергетичної дії на процеси сну та релаксації.

У зв'язку з цим виникає необхідність застосовувати методологію розглядати аудіо- та світлові стимули з урахуванням їхніх основних

параметрів. Така класифікація забезпечить можливість проведення комплексного аналізу ефективності та характеру впливу різних типів звукових і світлових сигналів на процес засинання та загальну якість сну. Далі буде наведено структурований підхід для класифікації аудіо- та світлових стимулів за науково обґрунтованими критеріями, що враховує їхні фізичні та психофізіологічні властивості.

Аналіз звукових стимулів. Діапазони частот

Інфразвукові хвилі, що охоплюють діапазон частот від 0 до 20 Гц, мають здатність проникати крізь тверді матеріали та взаємодіяти з людським організмом на рівнях, які не досягають свідомого сприйняття. Потенційний вплив інфразвуку є особливо значущим у контексті процесів сну та релаксації. Фізіологічні та резонансні властивості цих хвиль можуть як сприяти гармонізації біологічних ритмів, так і провокувати негативні стани, зокрема тривожність або дезорієнтацію. Хоча деякі наукові праці вказують на можливий позитивний ефект низькоамплітудного інфразвуку на процеси сну та релаксації [15], переважна частина досліджень свідчить про негативний вплив наднизьких звукових частот, що знаходяться поза межами слухового сприйняття людини. Особливо це стосується високих амплітуд, які можуть призводити до підвищення артеріального тиску, розвитку тахікардії та зростання рівня тривожності. Попри значну кількість спроб оцінити ефекти інфразвуку, його довгостроковий вплив на організм залишається недостатньо вивченим. Це зумовлено складністю адекватного моделювання реальних умов експозиції та наявністю індивідуальних відмінностей у сприйнятті таких стимулів.

Звукові коливання низькочастотного діапазону (20–200 Гц) є основним компонентом акустичного оточення, що впливає на емоційний фон, фізіологічні реакції та якість сну індивіда. Зазначені частоти перебувають у межах слухового сприйняття людини та часто корелюють із природними звуками, такими як віддалений грім, низькочастотний гул морських хвиль або серцебиття. Завдяки своїм фізичним властивостям низькочастотні звуки здатні вступати в резонанс із тканинами та органами людського тіла, що може зумовлювати заспокійливий або стабілізуючий ефект [16]. Ритмічно організовані низькочастотні звуки можуть викликати відчуття безпеки, що часто пов'язують із серцебиттям матері в період пренатального розвитку. Цей механізм пояснює їхній виражений релаксаційний потенціал, особливо для немовлят і осіб із підвищеним рівнем стресу. Низькочастотні звуки демонструють помітний седативний вплив, сприяючи швидшому переходу зі стану бадьорості до фази повільнохвильового сну.

Застосування низьких частот є поширеним у медитативних практиках, наприклад використання тибетських співочих чаш або глибоких басових тонів традиційних музичних інструментів. Їх монотонне повторення сприяє формуванню стану «зміщеної уваги», що посилює релаксацію.

Звукові коливання середньочастотного діапазону (200–2000 Гц) займають головне місце в акустичному спектрі, оскільки більшість звуків природного та побутового середовища належать саме до цього діапазону. Слухова система людини демонструє максимальну чутливість до зазначених частот, що зумовлено еволюційними адаптаціями: у цьому діапазоні локалізовані звуки людського мовлення, спів птахів, шум води, шелест листя та інші значущі сигнали.

У контексті забезпечення сну і релаксації середньочастотні звуки мають специфічну здатність формувати комфортне акустичне тло, сприяти розслабленню і стабілізації емоційного стану [17]. Чутливість людського вуха є найвищою в діапазоні 500–4000 Гц, де середньочастотні звуки займають центральну позицію. Це забезпечує їх легке та природне сприйняття, а також мінімізує навантаження на слуховий аналізатор навіть за тривалої експозиції. Такі звуки є оптимальним фоном для засинання, оскільки не викликають дискомфорту чи подразнення слухової системи. Наприклад, звуки дощу або шелесту листя мають заспокійливий ефект і сприяють плавному переходу до сну. Крім того, середньочастотні звуки можуть ефективно маскувати різкі зміни рівня гучності навколишнього середовища, такі як транспортний шум або гучні розмови [17].

Звукові коливання високочастотного діапазону (2000–20000 Гц) становлять верхню межу сприйняття слуховою системою людини. Ці звуки, залежно від їхніх інтенсивності, природи та контекстуальних умов, можуть як стимулювати когнітивні процеси, так і сприяти досягненню стану релаксації. Оскільки вони локалізовані поблизу верхнього порогу слухового сприйняття, їхній вплив на організм часто є менш дослідженим порівняно з низькими та середніми частотами. У контексті сну та релаксації високочастотні звуки демонструють складний і неоднозначний характер впливу, що залежить від їхніх акустичних характеристик. Нервова система людини еволюційно адаптована до певних високочастотних природних звуків, наприклад співу птахів, який може сигналізувати про безпечне середовище [18]. Водночас різкі високочастотні звуки (такі як писк або скрип) здатні активувати захисні механізми, викликаючи, наприклад, почуття тривоги. Тривалий вплив високих частот, особливо якщо звуки мають різкий характер, може призводити до швидкого стомлення слухової системи, спричиняючи дискомфорт або навіть збудження нервової системи.

Однак, маючи плавний характер і помірну інтенсивність, високочастотні звуки можуть бути корисними для релаксації та формування заспокійливої акустичної обстановки.

сприяє зниженню суб'єктивного сприйняття шуму у вухах.

Аналіз звукових стимулів. Шуми та природні звуки, їх поєднання

Білий шум визначено як стаціонарний шумовий сигнал, спектральна щільність потужності якого є рівномірною в усьому частотному діапазоні (рис. 1). Він має високу ефективність маскування інших звукових сигналів, особливо з обмеженим частотним спектром. Ця властивість дає змогу мінімізувати вплив несподіваних акустичних подразників (наприклад шуму транспортних засобів, гучних розмов), здатних порушувати процес сну. Однак тривала експозиція білого шуму може призвести до слухової втоми внаслідок одночасного навантаження на весь діапазон аудіальних частот [19].

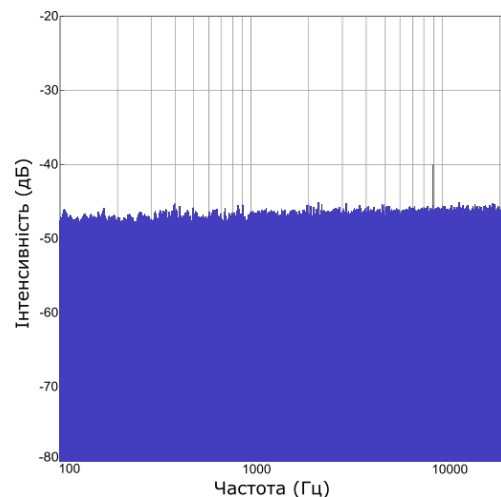


Рис. 1. Спектр білого шуму

Рожевий шум є модифікацією білого шуму з рівномірним спадом інтенсивності зі зростанням частоти (залежність типу $1/f$) (рис. 2). Завдяки такій спектральній характеристиці людський слух сприймає рожевий шум як «м'якший» і більш природний. У систематичному огляді «Systematic review: auditory stimulation and sleep» [20] продемонстровано, що застосування рожевого шуму під час сну сприяє покращенню його якості. Рожевий шум, аналогічно білому, ефективно маскує зовнішні акустичні подразники, проте, на відміну від білого шуму, не викликає відчуття акустичного перенавантаження. Ця особливість робить його оптимальним для тривалого використання.

Для коричневого шуму (червоного шуму) характерний ще більш значний спад інтенсивності високочастотних компонентів порівняно з рожевим шумом (рис. 3). У спектрі коричневого шуму домінують низькі частоти, що формує глибоке, м'яке акустичне тло. Такий тип шуму є більш прийнятним для досягнення заспокійливого ефекту, однак може бути менш ефективним для осіб, які потребують маскування високочастотних звукових подразників [21].

Сірий шум є спектрально модифікованим типом шуму, гучність якого регульована відповідно до кривої чутливості людського слуху (рис. 4). Цей вид шуму розроблений для забезпечення максимально комфортного сприйняття, оскільки враховує фізіологічні особливості слухового аналізатора, що робить його оптимальним для осіб із підвищеною чутливістю. Завдяки адаптації до аудіальної кривої людини сірий шум ефективно маскує сторонні звуки, створюючи суб'єктивне відчуття тиші. Сірий шум часто застосовують у терапії тинітусу, оскільки він

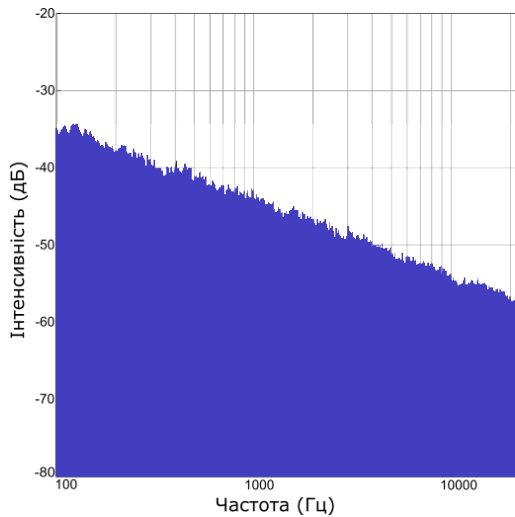


Рис. 2. Спектр рожевого шуму

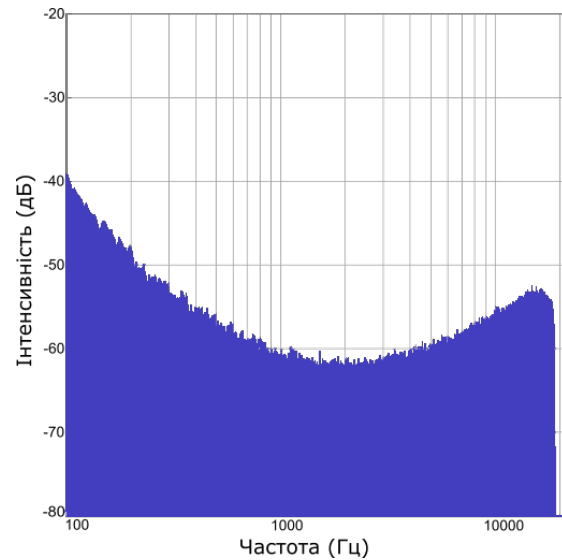


Рис. 4. Спектр сірого шуму

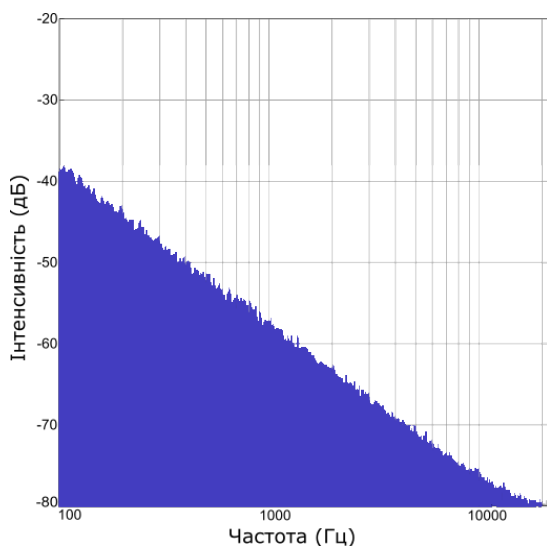


Рис. 3. Спектр коричневого шуму

Природні акустичні стимули, такі як шум дощу, морських хвиль або шелест листя, часто демонструють характеристики, властиві певним типам шуму (наприклад рожевому або білому), формуючи в такий спосіб комфортне та натуральне звукове тло. Еволюційно закріплені реакції на ці звуки викликають асоціації з безпечним середовищем, що сприяє зниженню рівня тривожності. Крім того, вони зазвичай мають м'який спектральний склад, як, наприклад, шум дощу, що забезпечує комфортне маскування інших акустичних подразників.

Комбінування різних типів шумів дає можливість для створення багатошарових акустичних середовищ, які можуть бути адаптовані до специфічних потреб користувача.

Аналіз звукових стимулів. Ембійентні композиції

Ембійентна музика є специфічним жанром, що формує звукове середовище, орієнтоване на занурення слухача в атмосферу релаксації, спокою або медитативного стану. Характерною ознакою цього жанру є мінімальний акцент на мелодичній чи ритмічній складовій; натомість основну увагу приділено текстурі звуку, його тональним характеристикам і глибині. Завдяки цим особливостям ембійентна музика може бути ефективнішим засобом для покращення сну та відпочинку порівняно з різними типами шуму, оскільки вона здатна створювати стабільне і мінімалістичне акустичне середовище, позбавлене чітко виражених ритмів чи різких коливань інтенсивності. На відміну від білого, рожевого чи коричневого шуму, які можуть мати рівномірний частотний спектр, ембійентна музика має

потенціал адаптуватися до природних флуктуацій уваги та настрою слухача, що сприяє глибокій релаксації. Вона може плавно трансформувати звукові текстури, імітуючи природні звуки або створюючи гармонійні звукові пейзажі, які налаштовують на спокій і сприяють підготовці до сну. Крім того, ембійентні композиції зазвичай не містять різких переходів або подразнюючих елементів, що знижує ймовірність виникнення неспокою чи пробудження під час сну [22]. Широкий спектр піджанрів ембійентної музики дає змогу застосовувати індивідуалізований підхід, ураховуючи особисті преференції та потреби слухача, що підвищує ефективність її використання для поліпшення якості сну та релаксації.

Аналіз світлових стимулів

Теплі відтінки світлового спектра, зокрема жовтий, оранжевий і червоний, мають значний вплив на психофізіологічний стан людини. Жовтий і оранжевий кольори часто асоціюються з відчуттям тепла, комфорту і спокою. Вони здатні знижувати рівень стресу, формуючи сприятливу атмосферу, особливо в терапевтичних або релаксаційних зонах.

Наприклад, жовте освітлення часто застосовують у дизайні інтер'єрів для створення затишку, оскільки воно імітує природне світло заходу сонця, що сприяє розслабленню. Проте червоний колір, незважаючи на свою належність до теплої гама, може викликати протилежний ефект. Він асоціюється з енергією, активністю і навіть потенційною небезпекою. Надмірна експозиція червоного світла може спричинити збудження, підвищити рівень стресу та навіть призвести до порушень сну. Це пояснюють тим, що червоний колір стимулює симпатичну нервову систему, що може перешкоджати процесам релаксації та підготовки до сну [23, 24].

Холодні кольори, такі як синій, блакитний і зелений, відіграють важливу роль у регуляції циркадних ритмів та емоційного стану. Синє та блакитне світло, зокрема, впливають на секрецію мелатоніну. Наукові дані свідчать, що експозиція синього світла у вечірній час може пригнічувати продукцію мелатоніну, що призводить до порушень сну. Однак у денний час синє світло здатне підвищувати рівень концентрації та продуктивності, оскільки воно імітує природне денне освітлення [10, 25]. Зелене світло, навпаки, сприяє досягненню емоційної рівноваги та релаксації. Його часто використовують у медитативних практиках і терапевтичних середовищах, оскільки допомагає знизити рівень тривожності та покращити концентрацію уваги. Холодні кольори є оптимальними для приміщень, де необхідні спокій і зосередженість, таких як медичні заклади, офісні простори або зони для медитації [26].

Нейтральні кольори, зокрема білий і сірий, забезпечують функціональне освітлення, що має мінімальний емоційний або фізіологічний вплив. Їх часто застосовують у сучасних інтер'єрних рішеннях, де пріоритетними є універсальність і нейтральність. Біле світло може мати як теплу, так і холодну кольорну температуру залежно від його спектрального складу, що дає змогу адаптувати його до різних потреб. Сірий колір зазвичай використовують для створення візуального балансу та виділення інших кольорів, не привертаючи до сірого надмірної уваги.

Інтенсивність світлового потоку є одним із основних факторів, що впливають на циркадні ритми та загальний стан організму. Уранці яскраве освітлення сприяє пробудженню, активізує мозкову діяльність і підвищує рівень енергії. Це пов'язано з тим, що висока інтенсивність світла стимулює синтез кортизолу – гормону, що відповідає за стан бадьорості. У вечірній час, навпаки, зниження інтенсивності освітлення сприяє виробленню мелатоніну, що готує організм до переходу в стан сну.

Надмірна експозиція яскравого світла вночі, особливо синьої частини спектра, може призводити до порушень сну, зниження якості відпочинку та навіть розвитку хронічних розладів, таких як інсомнія. Тому важливо адаптувати інтенсивність освітлення до часу доби, використовуючи, наприклад, димовані або теплі світлодіодні джерела світла у вечірні години [10].

Частота пульсацій світла також впливає на стан нервової системи. Високочастотне мерехтіння світла може викликати відчуття напруженості, дратівливості та навіть головний біль. Це особливо помітно, якщо використано низькоякісні світлодіодні лампи або дисплеї із низькою частотою оновлення. Навпаки, світло з низькою частотою пульсацій або стабільне, немерехтливе світло сприяє релаксації та комфорту. У терапевтичних цілях пульсуюче світло застосовують для лікування сезонних афективних розладів (САР) та інших психоемоційних станів. Однак для досягнення позитивного терапевтичного ефекту необхідний ретельний підбір частоти і тривалості експозиції.

Тривалість впливу світла є визначальним фактором у регуляції циркадних ритмів. Короткочасна експозиція яскравого світла вранці може бути достатньою для пробудження та підвищення рівня концентрації. Наприклад, 20-30 хвилин яскравого освітлення вранці можуть значно покращити рівень енергії та продуктивність протягом дня. Проте довготривала експозиція світла у вечірній час, особливо яскравого або синього спектра, може негативно вплинути на якість сну. Навіть незначна кількість світла від екранів смартфонів або комп'ютерів здатна призводити до затримки синтезу мелатоніну, що ускладнює процес засинання та

погіршує якість сну. Тому рекомендовано обмежувати вплив яскравого світла у вечірні години та використовувати режими «нічного освітлення» на електронних пристроях [27].

Градентні зміни колірної температури та яскравості освітлення є перспективним методом імітації природних циклів денного світла. Такий підхід сприяє підтриманню циркадних ритмів людини та покращенню загального фізіологічного і психологічного стану. Перехід від холодних, високоінтенсивних спектрів у денний час до теплих, приглушених відтінків увечері сприяє оптимізації секреції мелатоніну, забезпечуючи релаксацію та підготовку організму до сну. Такий поступовий спектральний зсув також мінімізує негативний вплив синього світла у вечірні години.

Поєднання градентних змін освітлення зі звуковими ефектами, такими як ембійтна музика або звуки природи, може значно посилити ефект розслаблення та покращити концентрацію уваги, створюючи гармонійний мультисенсорний досвід. Синхронізація переходу від яскравого до тьмяного освітлення зі зміною від енергійної до спокійної музики дає змогу досягти глибшого стану релаксації або зосередженості. Наприклад, тепле освітлення в поєднанні зі звуками природи, такими як шум океану, може створити сприятливу атмосферу в спальні, сприяючи сну, тоді як холодне освітлення разом із ембійтною музикою може забезпечити робочу атмосферу в домашньому офісі. Така комбінація використовує психологічні переваги як візуальних, так і слухових стимулів, потенційно покращуючи настрій і знижуючи рівень стресу. Практичні застосування вмикають системи «розумного будинку», які інтегрують регулювання освітлення та звуку, налаштовуючи персоналізовані параметри відповідно до індивідуальних уподобань. Однак важливо збалансувати інтенсивність обох типів стимулів, щоб уникнути сенсорного перевантаження, забезпечуючи персоналізований та ефективний досвід.

Розроблення пристрою

На підставі проведених досліджень впливу світлових і звукових стимулів на психофізіологічний стан людини встановлено, що цілеспрямовано підібране поєднання параметрів кольору, яскравості, інтенсивності освітлення та аудіосупроводу може дуже позитивно впливати на різні аспекти здоров'я. Зокрема, виявлено, що такі стимули сприяють поліпшенню якості сну, зниженню рівня стресу, а також підвищенню загального емоційного та фізичного тону.

Ураховуючи зазначені висновки, було ухвалено рішення про розроблення інноваційного розумного нічника, оснащеного системою модуляції світлових і звукових характеристик. Це забезпечить можливість автоматичного налаштування рівня освітленості, колірної температури та акустичного супроводу відповідно до індивідуальних потреб користувача. Такий підхід спрямований не лише на створення комфортних умов, але і гармонізацію біологічних ритмів через адаптацію навколишнього середовища до природних циклів людського організму. Окрім того, розумний нічник передбачатиме можливість персоналізації з урахуванням змінних факторів, таких як час доби, рівень денної активності користувача та його індивідуальні переваги. Отже, пристрій не тільки сприятиме полегшенню процесу засинання, але й допоможе створити оптимальні умови для релаксації, що робить його універсальним рішенням для різних сценаріїв застосування, виходячи за межі стандартних функцій нічника.

Усі функціональні можливості інтелектуального нічника зображені в деталізованій і структурованій формі у вигляді дерева функцій (рис. 5). Таке подання дає змогу чітко візуалізувати взаємозв'язок між основними та додатковими функціями пристрою, забезпечує повне розуміння архітектури його функціоналу, спрощує планування етапів розроблення та сприяє ефективному внесенню необхідних модифікацій чи доповнень.

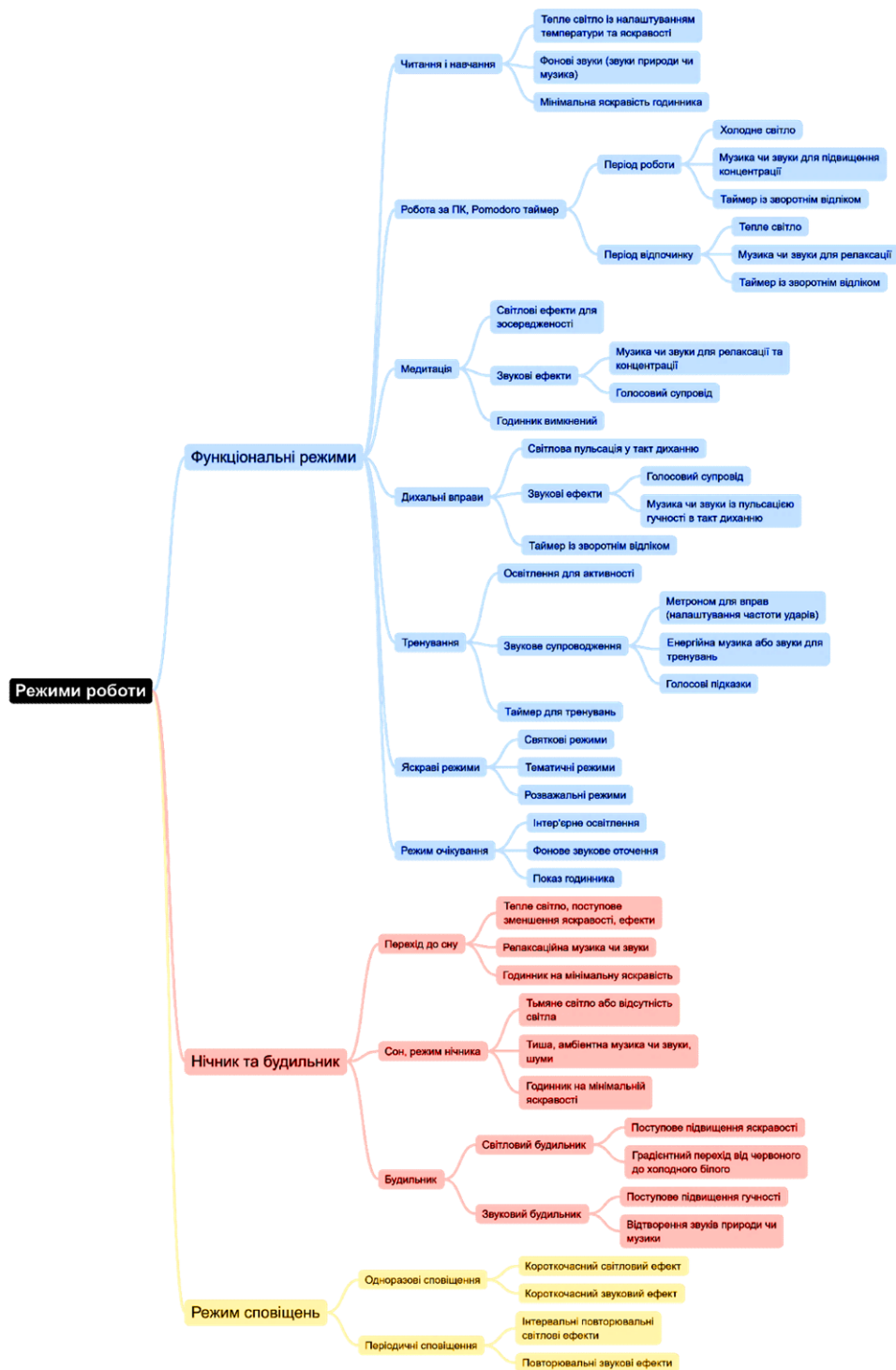


Рис. 5. Дерево функцій розумного нічника

Розроблення апаратної частини пристрою. За визначеним деревом функцій пристрою, наступним етапом є проектування апаратної платформи, здатної реалізувати весь запланований функціонал. У процесі вибору компонентної бази враховували технічні характеристики, показники енергоефективності, взаємну сумісність елементів і потенціал для майбутньої модернізації. Особливу увагу було

приділено інтеграції системних компонентів для забезпечення стабільної та синхронізованої роботи пристрою.

Основні компоненти і їхні технічні характеристики:

- **мікроконтролер ESP32-C6:** вибраний як центральний обчислювальний модуль, оснащений 32-

бітним RISC-V процесором із тактовою частотою до 160 МГц. Він забезпечує підключення периферійних пристроїв через 38 програмованих виводів загального призначення (GPIO) і підтримує сучасні бездротові стандарти зв'язку: Wi-Fi 6, Bluetooth 5 (Low Energy), Thread та Zigbee;

- **цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) PCM5102:** високоякісний аудіо ЦАП, що забезпечує співвідношення сигнал/шум (SNR) на рівні 112 дБ і вихідну напругу 2VRMS. Підтримує аудіоформати з розрядністю 16, 24 і 32 біти і взаємодіє через інтерфейс I2S;

- **підсилювач потужності PAM8403:** високоефективний стереофонічний аудіопідсилювач класу D. Забезпечує вихідну потужність 3 Вт на канал за напруги живлення 2.5-5.5 В, має низький рівень спотворень і високу ефективність (до 90 %). Можна підключати динаміки без необхідності використання зовнішніх фільтрів низьких частот;

- **аудіодинаміки:** два широкосмугові динаміки діаметром 60 мм і номінальною потужністю 5 Вт, побудовані на основі неодимових магнітів для покращеної якості звуку;

- **світлодіодна стрічка ARGB:** використовують стрічку з адресними світлодіодами типу WS2812B, загальною кількістю 64 світлодіоди для створення динамічних кольорних ефектів;

- **світлодіодна стрічка білого світла:** стрічка на базі світлодіодів SMD2835 з колірною температурою 5500 К і загальною кількістю 84 світлодіоди для основного освітлення;

- **MOSFET-транзистор AO3400:** використовують для керування яскравістю білої світлодіодної стрічки за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ);

- **перетворювач логічних рівнів BOB-11978:** забезпечує узгодження логічних рівнів із 3.3 В (вихід мікроконтролера) до 5 В (вхід ARGB стрічки);

- **дисплей HW-069:** чотирирозрядний семисегментний індикатор з інтегрованим контролером TM1637, призначений для відображення цифрової інформації, такої як поточний час, значення таймерів та інші службові індикатори;

- **модуль реального часу (RTC) HW-111:** реалізований на базі мікросхеми DS1307 з інтерфейсом I2C. Забезпечує відлік секунд, хвилин, годин, днів тижня, дат, місяців і років. Містить 56 байтів статичної пам'яті (SRAM) із резервним живленням від батареї та споживанням менше 500 нА в режимі резервного живлення;

- **модуль SD-карти:** призначений для зберігання файлів конфігурації пристрою та аудіотреків;

- **сенсорні кнопки TTP223:** емнісні сенсорні кнопки, використовувані для спрощеного керування основними функціями пристрою без необхідності використання мобільного застосунку.

Інтеграція зазначених компонентів є наступним критичним етапом у розробленні апаратної частини пристрою. Цей процес передбачає не лише фізичне з'єднання елементів, але й ретельне налагодження їхньої взаємодії для досягнення оптимальної продуктивності та повної реалізації функціональних можливостей. Контролер ESP32-C6 виконує роль центрального координуючого елемента, що керує роботою всіх підключених периферійних пристроїв, забезпечуючи їхню синхронізацію та обмін даними через відповідні інтерфейси. Принципова електрична схема розробленого пристрою подана на рис. 6.

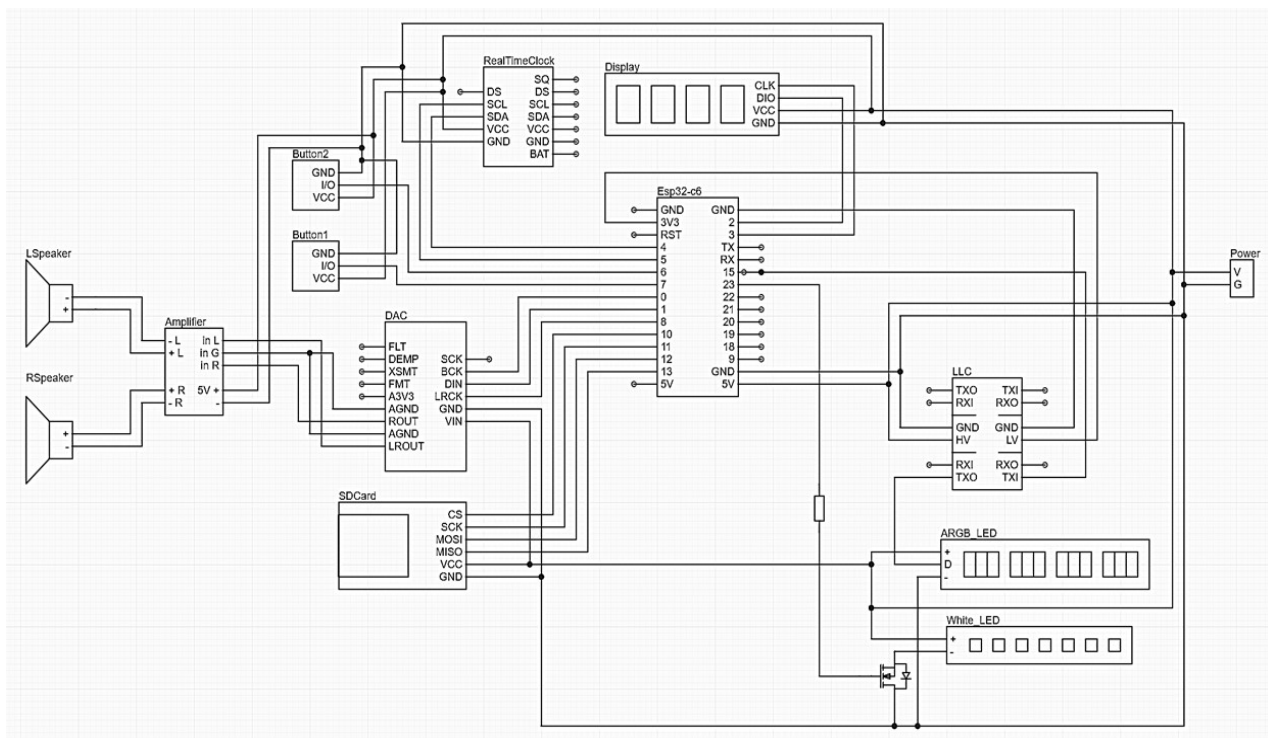


Рис. 6. Принципова схема розумного нічника

Апаратні модулі: відповідають за взаємодію з периферійними пристроями, такими як дисплей, світлодіодні стрічки та аудіосистема.

Розроблення програмної частини пристрою
Програмне забезпечення відіграє головну роль у забезпеченні належного функціонування всіх апаратних компонентів системи. Воно структуроване на два основні рівні: вбудоване програмне забезпечення (прошивка), що безпосередньо керує апаратною частиною пристрою, і мобільний застосунок, призначений для взаємодії з користувачем та керування пристроєм.

Вбудоване програмне забезпечення має модульну архітектуру, де кожен програмний модуль відповідає за певні аспекти функціонування системи. Такий підхід забезпечує високий рівень гнучкості, полегшує адаптацію та розширення функціоналу з упровадженням нових можливостей. Схема модульної структури програмного забезпечення наведена на рис. 7. Ця структура є ієрархічною та складається з чотирьох основних груп модулів.

Комунікаційні модулі: забезпечують обмін даними зі смартфоном (для налаштування пристрою, передавання біометричних даних), зв'язок із серверами (для завантаження аудіотреків та оновлень програмного забезпечення), а також інтеграцію з системами «розумного будинку».

Ядро системи: містить критично важливі компоненти, включаючи менеджери процесів (для загального керування пристроєм), конфігурацій, станів, оновлень, сховища даних, а також обробники подій і команд. Цей модуль контролює загальну продуктивність системи та забезпечує узгоджену роботу всіх інших програмних модулів.

Функціональні модулі: реалізують специфічні функції пристрою, такі як керування освітленням, відтворення звукових ефектів та обробка часових параметрів, що дає змогу пристрою виконувати свою основну роль розумного нічника.

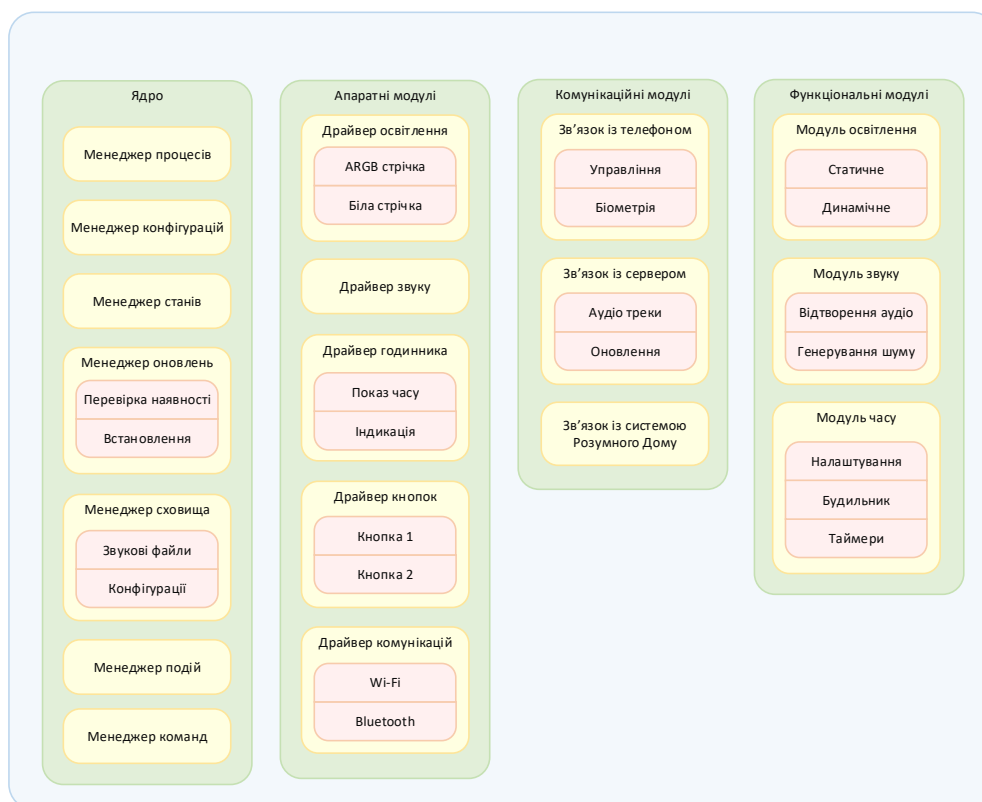


Рис. 7. Модульна структура внутрішнього ПЗ розумного нічника

Мобільний застосунок виконує дві основні функції: керування пристроєм (налаштування параметрів, зміна режимів роботи) і передавання біометричних даних користувача на пристрій для коректної реалізації основного сценарію роботи розумного нічника. Додатково передбачена функція підлаштування параметрів пристрою на основі суб'єктивного оцінювання якості сну користувачем. Принцип роботи сценарію сну детально описаний на

рис. 8. Демонстраційні знімки екранів мобільного застосунку подані на рис. 9. Загалом за допомогою мобільного застосунку користувач отримує можливість легко та зручно взаємодіяти з розумним нічником, налаштовуючи його відповідно до своїх індивідуальних потреб та отримуючи максимальну користь від його функціональних можливостей.

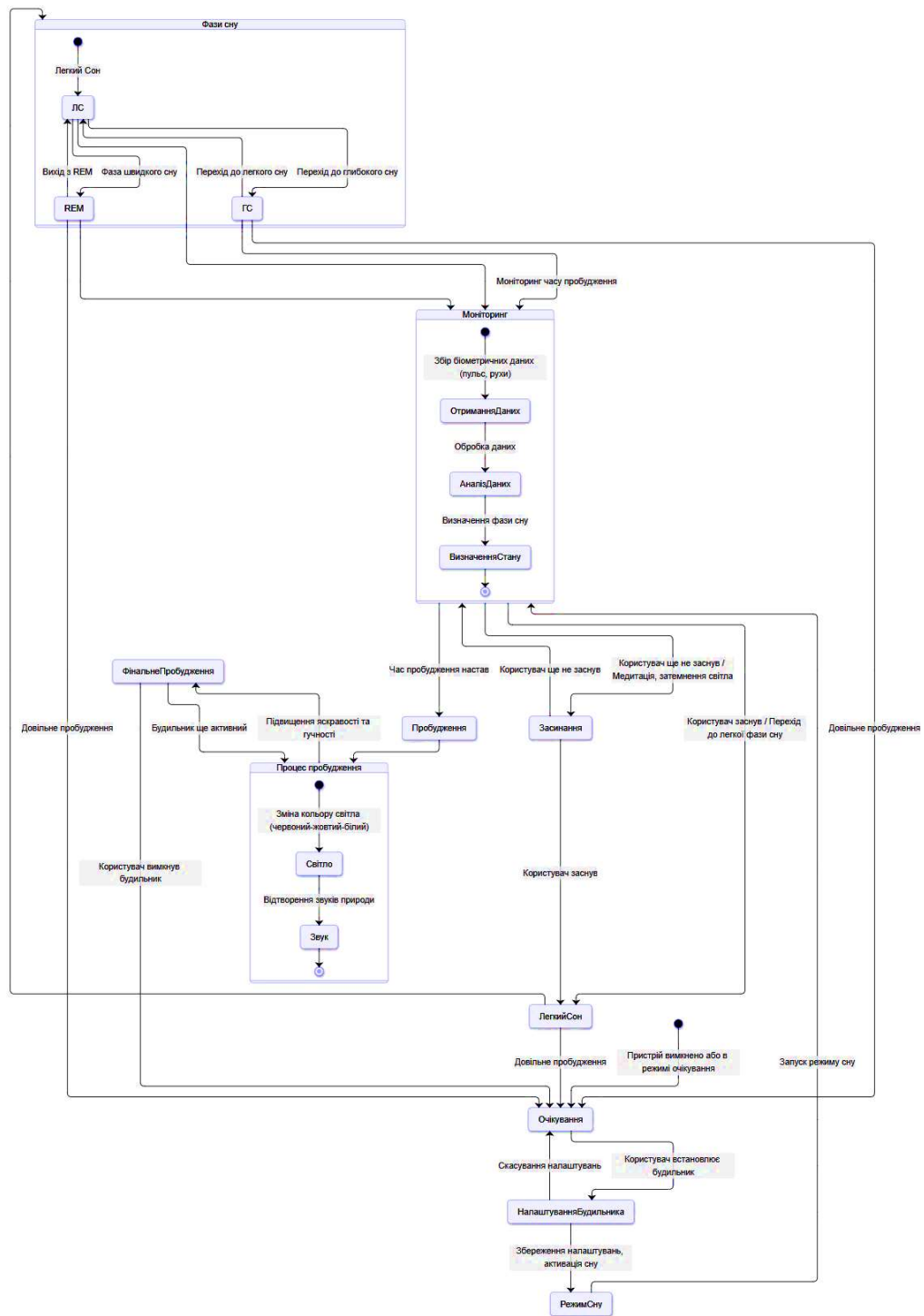


Рис. 8. Діаграма станів основного профілю роботи розумного нічника

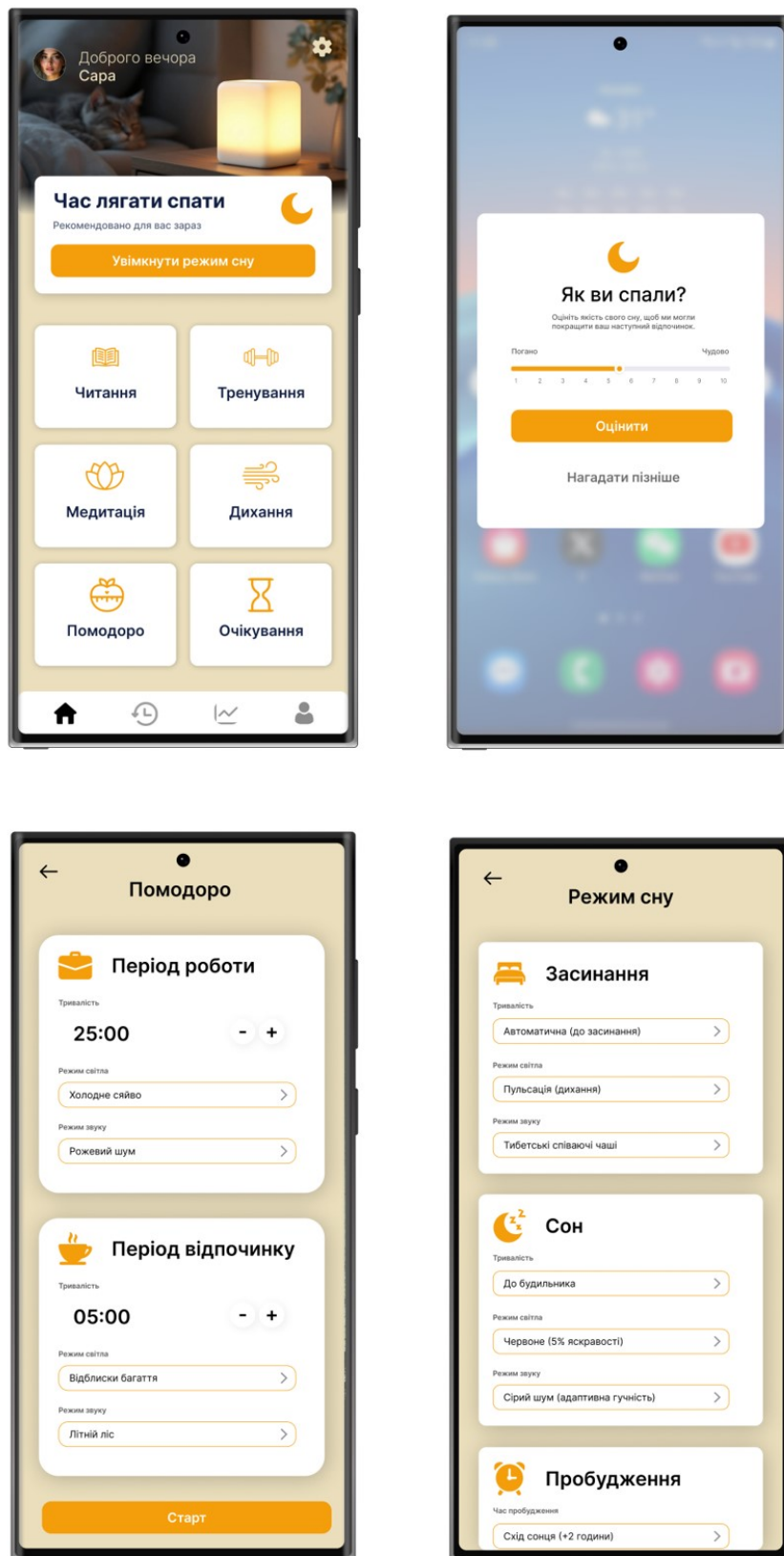


Рис. 9. Скриншоти мобільного застосунку для керування розумним нічним
Дослідження роботи пристрою

Для оцінювання ефективності розробленого нічника було проведено детальне дослідження, у якому взяли участь 20 волонтерів із здобувачів вищої освіти. Усі учасники були ретельно поінформовані про мету і процедуру дослідження та дали інформовану згоду на участь. Формували вибірку з урахуванням різноманітності хронотипів (ранкові, вечірні та проміжні типи) та індивідуальних особливостей сну, що дало змогу забезпечити різнобічне оцінювання впливу пристрою на різні категорії користувачів.

Етапи дослідження

Дослідження функціональності пристрою тривало протягом чотирьох тижнів, причому кожен тиждень мав свою специфічну мету.

Перший тиждень – контрольний період. Учасники дотримувалися свого звичайного режиму сну без використання розумного нічника. Цей етап був призначений для фіксації базових показників сну кожного учасника, які надалі слугували контрольною групою для порівняльного аналізу.

Другий тиждень – адаптаційний період. Протягом цього тижня учасники самостійно здійснювали підбір оптимальних параметрів і налаштувань розумного нічника. Їм була дана можливість експериментувати з колірною гамою світла, його яскравістю, звуковими ефектами та їхньою гучністю для визначення найбільш комфортних та ефективних індивідуальних конфігурацій.

Наступні два тижні – період безпосереднього тестування. Після завершення адаптаційного періоду учасники використовували вибрані ними індивідуальні налаштування пристрою. Це дало змогу зібрати дані про вплив функціонування пристрою на якість сну в довгостроковій перспективі.

Критерії оцінювання якості сну

У процесі дослідження для оцінювання якості сну було зібрано як об'єктивні, так і суб'єктивні показники. Поєднання цих двох підходів дало змогу сформуванню комплексне уявлення про стан сну учасників і вплив різних стимулів на його якість.

Об'єктивні показники вимірювали за допомогою фітнес-трекерів і смарт-годинників, що забезпечило збирання відносно точних даних про фізіологічні процеси під час сну. Зокрема, реєстрували такі параметри:

- **загальна тривалість сну:** часовий інтервал від моменту засинання до остаточного пробудження. Цей показник відображує достатність часу для відновлення організму;
- **відсоткове співвідношення фаз сну:** частка глибокого, легкого сну та REM-фази (фази швидкого руху очей). Аналіз цих фаз дає змогу

оцінити структурну повноцінність сну та ефективність відновлювальних процесів;

- **кількість нічних пробуджень:** кількість переривань сну, що можуть впливати на його безперервність і глибину. Часті пробудження можуть вказувати на наявність зовнішніх або внутрішніх факторів, які перешкоджають якісному відпочинку;

- **середня частота серцевих скорочень під час сну:** цей параметр відображує рівень фізіологічного спокою та може опосередковано вказувати на наявність стресових факторів або відхилень у функціонуванні серцево-судинної системи;

- **латентність сну:** часовий проміжок між відходом до ліжка та фактичним засинанням. Скорочення цього періоду свідчить про покращення умов для засинання та зниження рівня тривожності.

Суб'єктивні показники були зібрані шляхом щоденного опитування учасників. Кожен учасник самостійно оцінював якість свого сну за 10-бальною шкалою, де 1 бал означав дуже поганий сон, що супроводжувався відчуттям втоми, недосипання, труднощами із засинанням або частими пробудженнями, а 10 балів відповідали ідеальному сну з відчуттям повного відпочинку, бадьорості та відсутності будь-якого дискомфорту після пробудження.

Включення суб'єктивної оцінки дало змогу врахувати індивідуальне сприйняття якості сну, яке може відрізнятися від об'єктивних фізіологічних вимірювань. Це важливо, оскільки навіть за умов схожих фізіологічних показників різні індивіди можуть по-різному оцінювати своє самопочуття після сну.

Поєднання об'єктивних і суб'єктивних параметрів забезпечило більш повну та достовірну картину впливу світлових і звукових стимулів на якість сну. Такий комплексний підхід дав змогу не лише кількісно оцінити зміни, але й зрозуміти їхню суб'єктивну значущість із точки зору самопочуття учасників. Отримані дані є критично важливими для подальшого вдосконалення пристрою та методик його застосування.

Аналіз впливу пристрою на якість сну

Після завершення етапу збору та систематизації даних було проведено поглиблений аналіз кожного з визначених параметрів із залученням методів описативної статистики. Для оцінювання загального рівня досліджуваних показників, ступеня варіативності отриманих даних і динаміки їхніх змін протягом періоду спостереження було вибрано відповідні статистичні інструменти. Застосування цих методів дає змогу сформуванню комплексне уявлення про вплив світлових і звукових стимулів на якість сну учасників дослідження.

Розрахунки здійснювалися за такими формулами:

- середнє ковзне для аналізу динаміки в часі

- середнє арифметичне для відображення загального рівня показників

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (1)$$

$$MA_k(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t x_i, \quad (3)$$

де $MA_k(t)$ – середнє ковзне в момент часу t ;

де $\bar{x}$ – середнє арифметичне;

x_i – значення ряду в момент i ;

N – кількість елементів;

k – розмір ковзного вікна.

x_i – значення елементів;

- стандартне відхилення для аналізу варіативності даних

Аналіз отриманих результатів

1. Латентність сну

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

де σ – стандартне відхилення;

N – кількість елементів у вибірці;

x_i – значення елементів вибірки;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне вибірки;

Латентність сну є важливим індикатором ефективності методик, спрямованих на релаксацію. Протягом першого контрольного тижня дослідження учасники фіксували значні труднощі із засинанням. Проте після початку використання пристрою, протягом наступних тижнів, спостерігали виражену тенденцію до скорочення часу, необхідного для переходу до стану сну (рис. 10). На рис. 11 продемонстровано, що середнє значення часу засинання зменшилося з 61 хвилини до 20 хвилин. Цей показник наближається до нормативних значень, які становлять 10-20 хвилин. Окрім того, зафіксовано зменшення середнього розкиду значень (дисперсії) з 13.6 до 6.3. Отже, спостерігали позитивну динаміку щодо скорочення часу засинання та підвищення його стабільності, що свідчить про ефективність застосування розробленого пристрою для поліпшення якості сну.

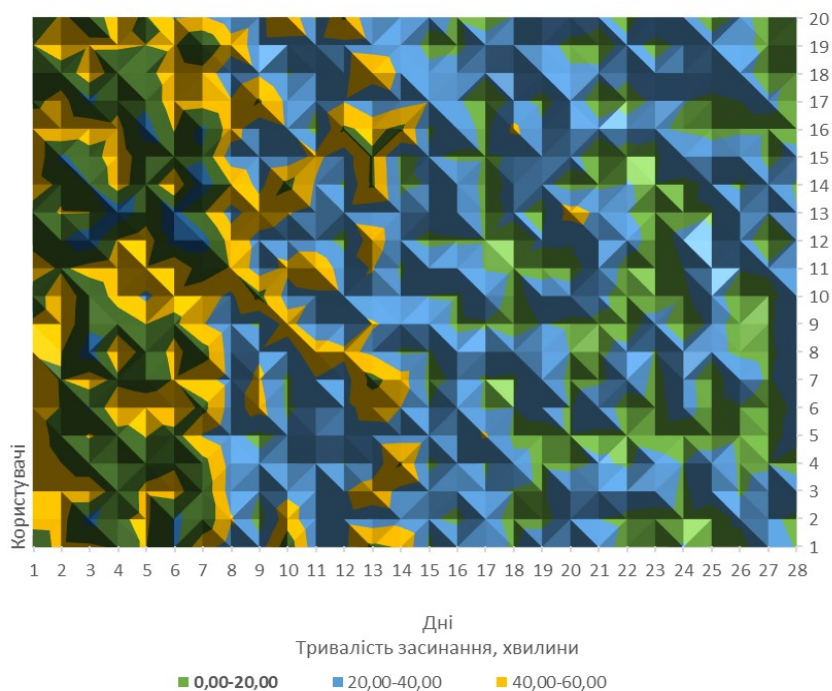


Рис. 10. Поверхнева діаграма розподілу тривалості засинання

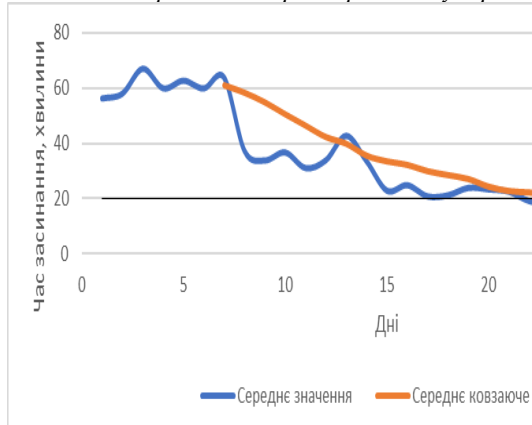


Рис. 11. Графік зміни тривалості засинання

2. Загальна тривалість сну

Аналіз показників тривалості сну продемонстрував, що використання розробленого пристрою сприяло подовженню сну в більшості учасників дослідження. Загальний розподіл тривалості сну подано на рис. 12. Для візуалізації тенденції було застосовано метод ковзних середніх із періодом усереднення сім днів (рис. 13). Порівняльний аналіз даних, отриманих до та після початку використання пристрою, виявив збільшення середньої тривалості сну на 13,5 %, а саме з 7,4 до 8,4 години. Зменшення середнього розкиду значень (дисперсії) не спостерігали, що можна пояснити вільним графіком сну учасників, без використання будильника. Отже, отримані результати свідчать, що пристрій ефективно подовжує тривалість сну, зберігаючи при цьому індивідуальні біологічні ритми.

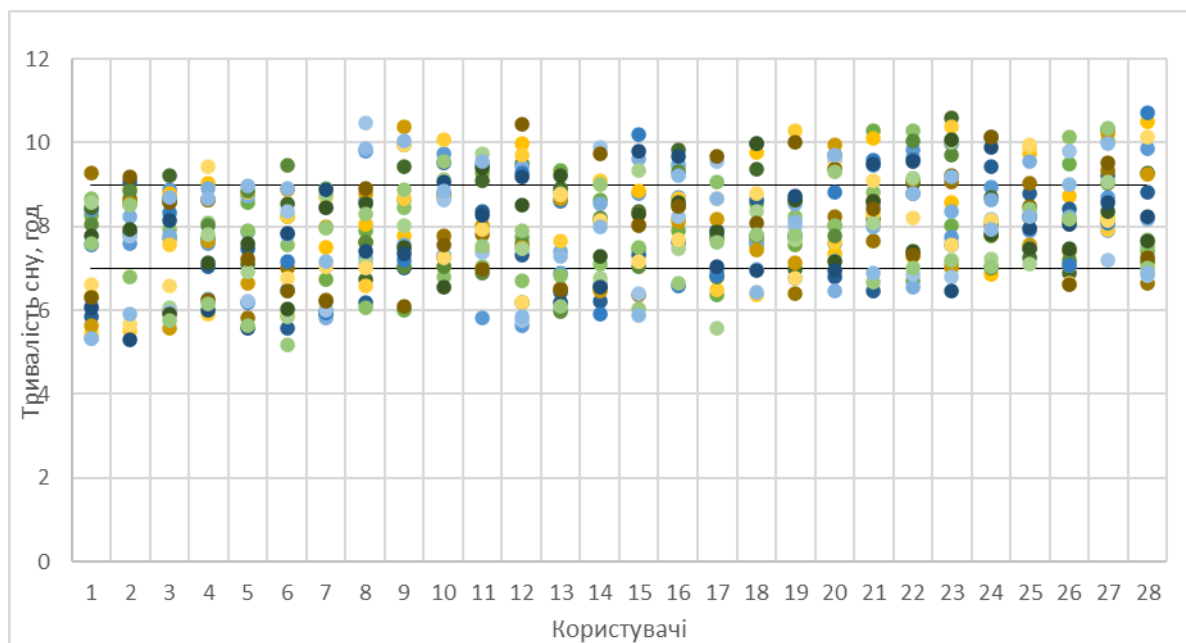


Рис. 12. Діаграма розподілу тривалості сну

3. Кількість нічних пробуджень

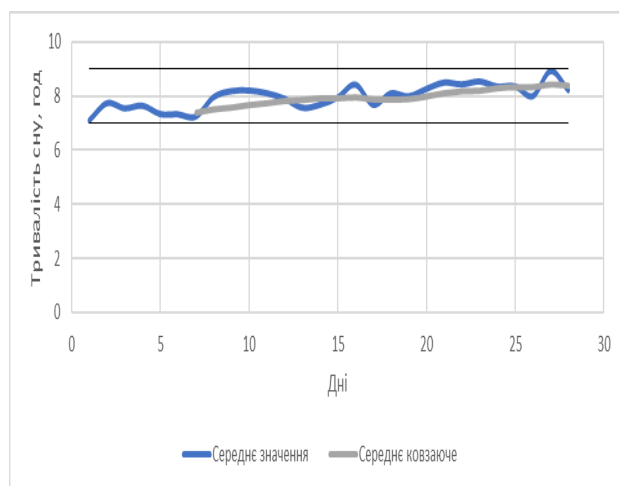


Рис. 13. Графік зміни тривалості сну

Кількість пробуджень протягом ночі є значущим індикатором якості сну. Протягом базового (контрольного) періоду дослідження учасники відзначали високу частоту пробуджень, що свідчило про нестабільність їхнього сну. Загальні дані про кількість пробуджень серед учасників подані на першому графіку (рис. 14). На другому графіку (рис. 15) відображено динаміку змін кількості пробуджень із застосуванням методу ковзних середніх із періодом усереднення сім днів. Порівняльний аналіз даних, отриманих до та після впровадження пристрою, продемонстрував зниження середнього значення кількості пробуджень з 2.6 до 0.7, що вказує на стабілізацію сну. Отже, використання розробленого пристрою сприяє зменшенню кількості нічних пробуджень, що є позитивною динамікою в контексті покращення загальної якості сну.

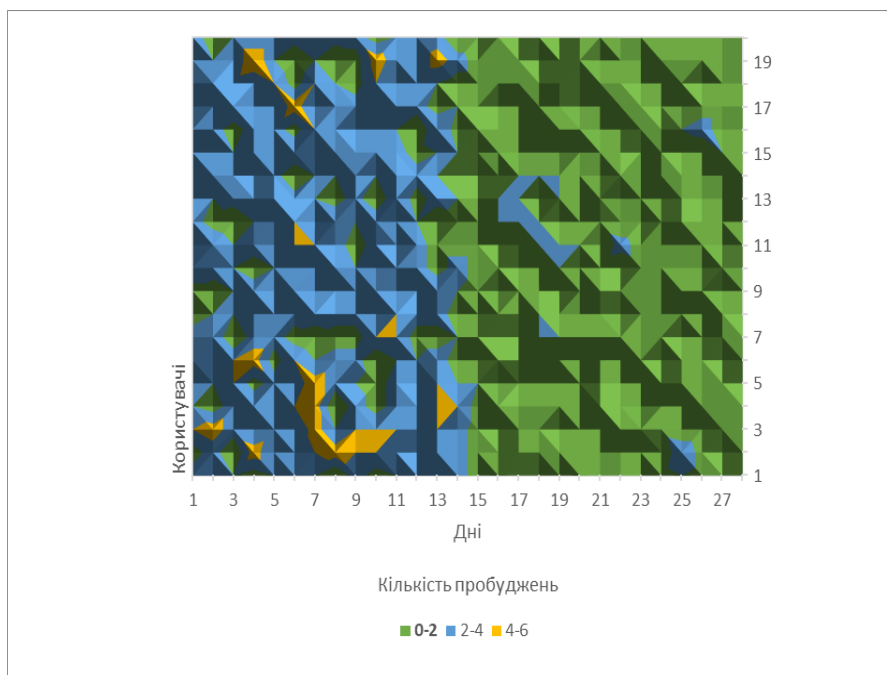


Рис. 1. Поверхнева діаграма розподілу кількості пробуджень

регуляцію серцевого ритму, зменшення фізіологічного збудження та суттєвий вплив на зниження рівня стресу.

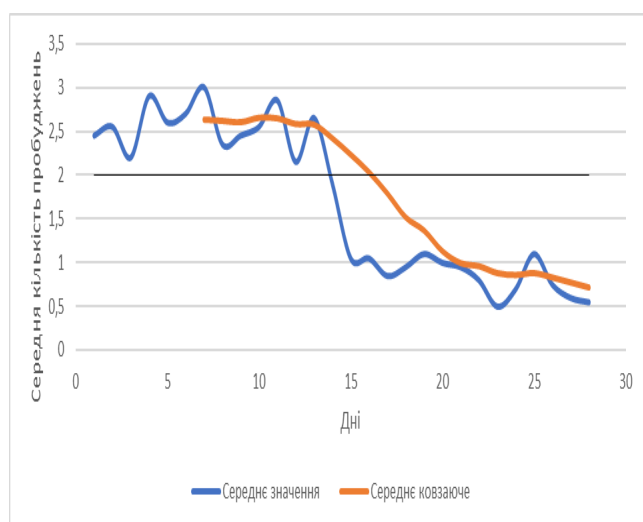


Рис. 2. Графік зміни кількості пробуджень

4. Середній пульс під час сну

Частота серцевих скорочень, зокрема середній пульс, є важливим фізіологічним показником, що відображає стан серцево-судинної системи та рівень стресового навантаження. Учасники дослідження, які застосовували розроблений пристрій, відзначали зниження середньої частоти пульсу протягом усього періоду спостереження (рис. 16). На рис. 17 показано, що середній пульс знизився з початкового значення 77 ударів за хвилину до 52 ударів за хвилину. Така динаміка зниження частоти серцевих скорочень свідчить про позитивний вплив пристрою на

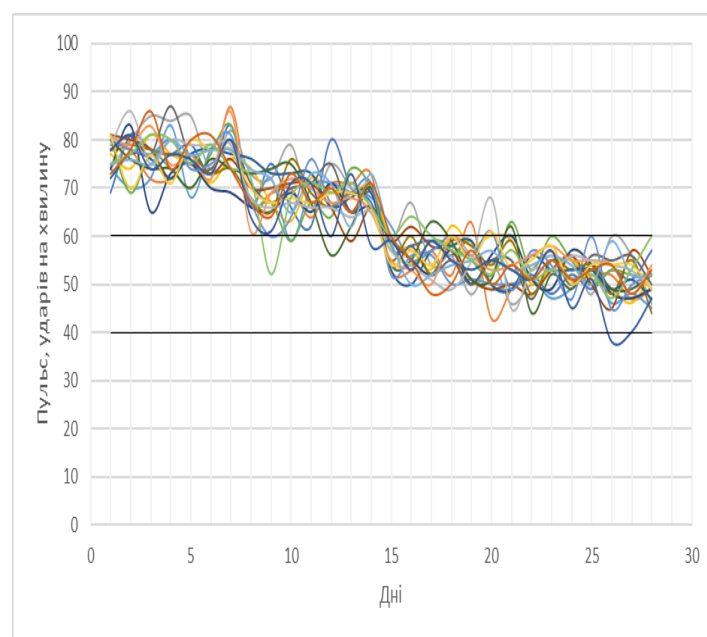


Рис. 3. Графік показників середнього пульсу

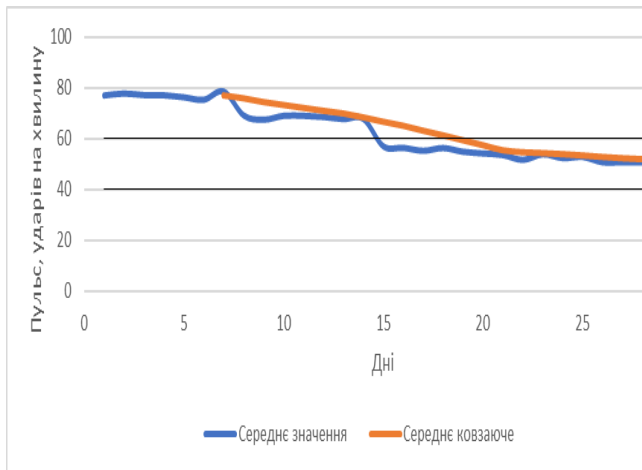


Рис. 4. Графік зміни середнього значення пульсу

5. Відсоткове співвідношення різних фаз сну

Аналіз фазової структури сну проводили для оцінювання впливу досліджуваного розумного

нічного на архітектуру сну користувачів. Результати дослідження продемонстрували, що протягом періоду використання пристрою спостерігали зміни у відсотковому співвідношенні окремих фаз сну. На рис. 18-20 відображено динаміку змін частки глибокого сну, легкого сну та REM-фази. Зокрема, було зафіксовано збільшення частки глибокого сну, що є критично важливим для процесів фізичного відновлення та консолідації когнітивних функцій. Водночас спостерігали зменшення частки поверхневого (легкого) сну. Відсоток REM-фази, яка відіграє головну роль у процесах консолідації пам'яті та емоційної регуляції, залишався практично незмінним. Слід зазначити, що параметри сну є високоіндивідуальними для кожної людини, тому отримані результати слід інтерпретувати з належною обережністю. Зміни у структурі сну можуть варіювати залежно від численних факторів, таких як вік, спосіб життя, наявність супутніх захворювань та інші індивідуальні особливості. Отже, у межах цього дослідження можна констатувати лише загальні тенденції про зміни фазової структури сну під впливом використання розробленого пристрою.

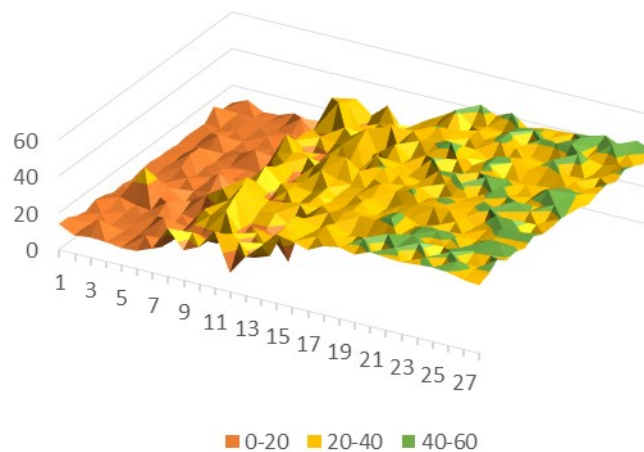


Рис. 18. Зміна відсоткового відношення фази глибокого сну

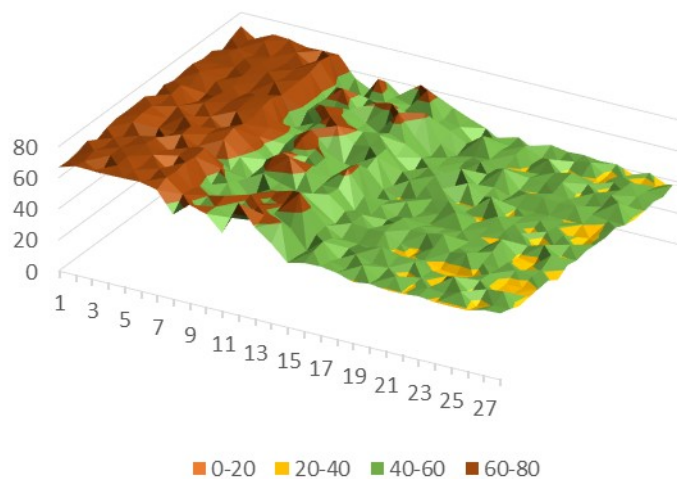


Рис. 19. Зміна відсоткового відношення фази легкого сну

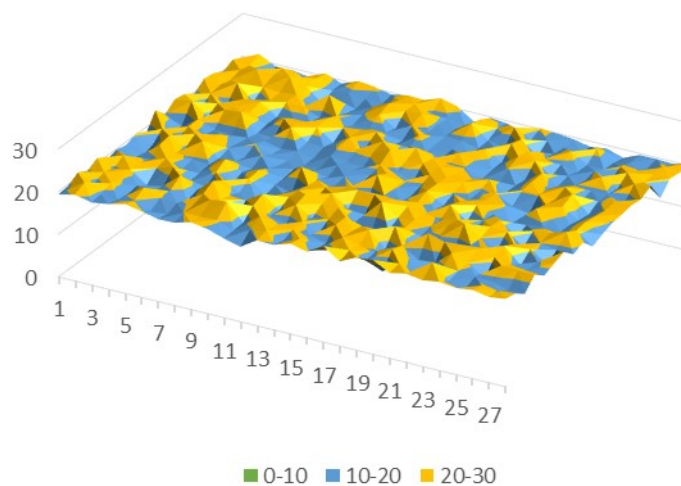


Рис. 20. Зміна відсоткового відношення REM-фази сну

6. Суб'єктивне оцінювання якості сну

Суб'єктивні оцінки, надані учасниками, є важливим доповненням до масиву об'єктивних даних. Більшість респондентів повідомили про покращення якості сну,

підвищення рівня бадьорості вранці та поліпшення загального настрою. Середня оцінка якості сну зросла з 4-5 балів до 8-9 балів за 10-бальною шкалою (рис. 21).

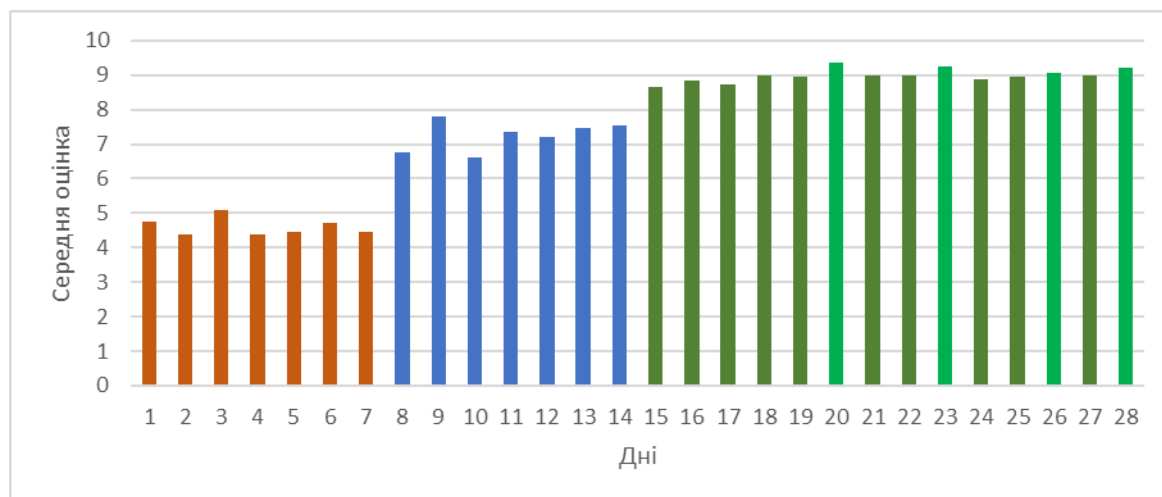


Рис. 21. Суб'єктивна оцінка впливу розумного нічника на сон

Аналіз отриманих даних свідчить про позитивний вплив використання розробленого пристрою на якість сну учасників дослідження. Спостерігали значне скорочення латентності сну, збільшення загальної тривалості сну та зменшення кількості нічних пробуджень, що вказує на ефективність пристрою в покращенні параметрів сну. Крім того, зниження середньої частоти серцевих скорочень під час сну та збільшення частки глибокого сну підтверджують позитивний вплив пристрою на фізіологічні показники та загальне самопочуття учасників.

Висновки

Розроблений у рамках цієї роботи розумний нічник із функцією світло-звукової модуляції продемонстрував значний позитивний вплив на якість сну учасників експериментального дослідження. Отримані результати підтверджують, що створений пристрій ефективно сприяє поліпшенню якості сну, що відображено суттєвим удосконаленням основних показників. Середній час засинання скоротився з 61 до 20 хвилин, наблизившись до рекомендованих нормативних значень, що свідчить про прискорений перехід користувачів до стану сну. Загальна тривалість сну збільшилася на 13,5 %, з 7,4 до 8,4 години, вказуючи на більш повноцінний і тривалий відпочинок. Кількість нічних пробуджень зменшилася з 2,6 до 0,7, що свідчить про стабілізацію сну та зменшення факторів, що перешкоджають його безперервності. Середня частота серцевих скорочень під час сну знизилася з 77 до 52 ударів за хвилину, що є позитивним індикатором зниження фізіологічного збудження та покращення стану серцево-судинної системи. Аналіз фазової структури сну показав збільшення частки глибокого сну та зменшення частки легкого сну, що є важливим для відновлення

фізичних сил і когнітивних функцій. При цьому відсоток REM-фази залишився практично незмінним, що вказує на відсутність порушень природних циклів сну з боку пристрою. Суб'єктивна оцінка якості сну учасниками зросла з 4-5 до 8-9 балів за 10-бальною шкалою, що підтверджує позитивний вплив пристрою на індивідуальне сприйняття сну та загальне самопочуття.

Розроблений пристрій інтегрує світлові та звукові стимули, даючи змогу індивідуально налаштовувати кожним користувачем, що підкреслює його високий ступінь персоналізації. Він може регулювати рівень освітленості, колірну температуру та акустичний супровід, що сприяє гармонізації біологічних ритмів і адаптації до природних циклів організму. Такий підхід дає змогу створити унікальне та комфортне середовище для сну, що сприяє покращенню якості відпочинку та загального психофізіологічного стану.

Результати дослідження підтверджують, що інтегрований підхід із застосуванням світло-звукової модуляції є ефективним інструментом для покращення якості сну та сприяння релаксації. Розроблений пристрій може бути корисним для осіб, які мають труднощі зі сном або прагнуть покращити його якість через створення персоналізованого середовища для відпочинку.

Список використаних джерел

1. Zisapel N. New perspectives on the role of melatonin in human sleep, circadian rhythms and their regulation. *British Journal of Pharmacology*.

2018. Т. 175. С. 3190–3199. DOI: 10.1111/bph.14116.
2. Besedovsky L., Lange T., Haack M. The Sleep-Immune Crosstalk in Health and Disease. *Physiological Reviews*. 2019. Т. 99, № 3. С. 1325–1380. DOI: 10.1152/physrev.00010.2018.
3. Piber D. The role of sleep disturbance and inflammation for spatial memory. *Brain, Behavior, & Immunity – Health*. 2021. Т. 17. Ст. 100333. DOI: 10.1016/j.bbih.2021.100333.
4. Stich F. M., Huwiler S., D’Hulst G., Lustenberger C. The Potential Role of Sleep in Promoting a Healthy Body Composition: Underlying Mechanisms Determining Muscle, Fat, and Bone Mass and Their Association with Sleep. *Neuroendocrinology*. 2022. Т. 112, № 7. С. 673–701. DOI: 10.1159/000518691.
5. Azmi N. A. S. M., Juliana N., Azmani S., Effendy N. M., Abu I. F., Teng N. I. M. F., Das S. Cortisol on Circadian Rhythm and Its Effect on Cardiovascular System. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Т. 18, № 2. Ст. 676. DOI: 10.3390/ijerph18020676.
6. Can Y. S., Iles-Smith H., Chalabianloo N., Ekiz D., Fernández-Álvarez J., Repetto C., Riva G., Ersoy C. How to Relax in Stressful Situations: A Smart Stress Reduction System. *Healthcare*. 2020. Т. 8, № 2. Ст. 100. DOI: 10.3390/healthcare8020100.
7. Hanson J. A., Huecker M. R. Sleep Deprivation. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2019. Оновлено: 12 червня 2023. PMID: 31613456.
8. Jentsch V. L., Merz C. J., Wolf O. T. Restoring emotional stability: Cortisol effects on the neural network of cognitive emotion regulation. *Behavioural Brain Research*. 2019. Т. 374. Ст. 111880. DOI: 10.1016/j.bbr.2019.03.049.
9. Sheel A. W., Boushel R., Dempsey J. A. Competition for blood flow distribution between respiratory and locomotor muscles: implications for muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*. 2018. Т. 125, № 3. С. 820–831. DOI: 10.1152/jappphysiol.00189.2018.
10. Blume C., Garbazza C., Spitschan M. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. *Somnologie (Berlin)*. 2019. Т. 23, № 3. С. 147–156. DOI: 10.1007/s11818-019-00215-x.
11. Morrow B. L., Kanakri S. The Effect of LED and Fluorescent Lighting on Children in the Classroom. *Матеріали конференції EDRA*. Оклахома, США, червень 2018.
12. Capezuti E., Pain K., Alamag E., Chen X., Philibert V., Krieger A. C. Systematic review: auditory stimulation and sleep. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2022. Т. 18, № 6. С. 1–10. DOI: 10.5664/jcsm.9860.
13. Kuula L., Halonen R., Kajanto K., Lipsanen J., Makkonen T., Peltonen M., Pesonen A.-K. The Effects of Presleep Slow Breathing and Music Listening on Polysomnographic Sleep Measures – a pilot trial. *Scientific Reports*. 2020. Т. 10. Ст. 7427. DOI: 10.1038/s41598-020-63966-5.
14. Hedblom M., Gunnarsson B., Iravani B., Knez I., Schaefer M., Thorsson P., Lundström J. N. Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment. *Scientific Reports*. 2019. Т. 9. Ст. 10113. DOI: 10.1038/s41598-019-46099-7.
15. Cheng C.-M., Lin T.-F., Chen Y.-J., Chen L.-B. Promoting Relaxation Using Monaural Beats With Ultralow-Frequency Inaudible Sounds: An Empirical Case Study. *IEEE Access*. 2022. Т. 10. С. 52605–52615. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173744.
16. Fooks C., Niebuhr O. Effects of Vibroacoustic Stimulation on Psychological, Physiological, and Cognitive Stress. *Sensors*. 2024. Т. 24, № 18. Ст. 5924. DOI: 10.3390/s24185924.
17. Yang W., Moon H. J. Effects of recorded water sounds on intrusive traffic noise perception under three indoor temperatures. *Applied Acoustics*. 2018. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.10.015.
18. Iyendo T. O. A Model for Understanding the Role of Sound Perception in Hospital Spaces: дис. ... канд. наук. Eastern Mediterranean University, 2016. 283 с.
19. Riedy S. M., Smith M. G., Rocha S., Basner M. Noise as a sleep aid: A systematic review. *Sleep Medicine Reviews*. 2021. Т. 55. Ст. 101385. DOI: 10.1016/j.smrv.2020.101385.
20. Capezuti E., Pain K., Alamag E., Chen X., Philibert V., Krieger A. C. Systematic review: auditory stimulation and sleep. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2022. Т. 18, № 6. С. 1–10. DOI: 10.5664/jcsm.9980.
21. Yoon H., Baek H. J. External Auditory Stimulation as a Non-Pharmacological Sleep Aid. *Sensors*.

2022. Т. 22, № 3. С. 1264. DOI: 10.3390/s22031264.
22. Waters S. Discreet Synthesizer: Allowing New Ambient Music to Emerge through Composition on Semi-Modular Synths: магістерська дис. Victoria University of Wellington, 2021.
 23. Дорогань І. В. Терапія кольором: психологічний та фізіологічний аспекти. *Культура і сучасність: альманах*. 2023. № 2. С. 105–111. DOI: 10.32461/2226-0285.2.2023.293876.
 24. Петренко А. І., Челомбітько В. Ф. Вплив кольору на емоційний стан людини. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: матеріали молодіжної школи-семінару IV Міжнар. наук.-техн. конф., 18-22 травня 2021 р.* Харків, 2021. Т. 2. С. 50-51. ISBN 978-617-7988-58-7.
 25. Kozaki T., Hidaka Y., Takakura J. Suppression of salivary melatonin secretion under 100-Hz flickering and non-flickering blue light. *Journal of Physiological Anthropology*. 2018. Т. 37. Ст. 23. DOI: 10.1186/s40101-018-0183-9.
 26. Li Y., Ru T., Chen Q., Qian L., Luo X., Zhou G. Effects of illuminance and correlated color temperature of indoor light on emotion perception. *Scientific Reports*. 2021. Т. 11. Ст. 14351. DOI: 10.1038/s41598-021-93755-0.
 27. Siraji M. A., Spitschan M., Kalavally V. et al. Light exposure behaviors predict mood, memory and sleep quality. *Scientific Reports*. 2023. Т. 13. Ст. 12425. DOI: 10.1038/s41598-023-39636-y.

DEVELOPMENT OF A SMART NIGHTLIGHT WITH LIGHT AND SOUND MODULATION

Abstract.

The research is devoted to the creation of an innovative smart nightlight that uses light and sound modulation to improve sleep and relaxation. The study analyzes the effect of acoustic stimuli (white, pink, brown noise, natural sounds, ambient music) and light parameters (color, intensity, pulsation) on a person. The device integrates adaptive algorithms, adjusting lighting and sound according to the time, user's state, and preferences. The development included hardware for modulation and software - firmware and a mobile application. Experiments have confirmed a significant improvement in sleep quality: reduced latency, increased duration and depth of sleep, fewer awakenings, and lower heart rate.

Keywords: smart night light, light and sound modulation, sleep quality, relaxation.

Куш Микола Юрійович, другий (магістерський) рівень навчання, група 211-AKІТР-D24, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (063) 610-00-72. E-mail: nk.kusch@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0009-3078-4671>.

Аббасов Олег Олександрович, другий (магістерський) рівень навчання, група 211-AKІТР-D24, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 489-30-34. E-mail: abbasov.oleg@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1299-5903>. Kushch Mykola, second (master's) level of study, group 211-ACITR-D24, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (063) 610-00-72. E-mail: nk.kusch@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0009-3078-4671>.

Abbasov Oleh Oleksandrovych, second (master's) level of study, group 211-AKІТР-D24, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 489-30-34. E-mail: abbasov.oleg@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1299-5903>.

ФІЛІМОНЧУК Т. В., к.т.н., доцент,
КОПАЙЛО Я. Р., магістрант,
ПАРТИКА С. О.,
СЕВОСТЬЯНОВА О. М.
(Харківський національний університет радіоелектроніки)

Модель автоматизації збору даних із вебресурсів на основі генеративного штучного інтелекту

Анотація. *Актуальність* дослідження зумовлена тим, що в сучасних умовах стрімкої диджиталізації, глобального розвитку інтернету та безперервного зростання обсягів даних, отриманих із різноманітних вебресурсів, зростає потреба в розробці ефективних інструментів для автоматизованого збирання, аналізу та структурування інформації. Вебскрапінг став невіддільною складовою процесів інформаційного забезпечення в багатьох галузях. Проте традиційні методи збору даних часто потребують складного ручного налаштування, що ускладнює масштабування систем та оперативне реагування на зміни структури вебсторінок. У зв'язку з цим використання універсальних правил та алгоритмів для створення вебскраперів набуває особливої актуальності. Особливу роль у цьому відіграють сучасні мовні моделі (LLM), здатні генерувати адаптивні рішення, зокрема у вигляді динамічних виразів XPath, що використовуються для ефективного вилучення потрібної інформації з HTML-структури вебсторінок. Такий підхід дає змогу створити масштабовані та самонавчальні системи збору вебданих, які здатні адаптуватися до різних форматів контенту та швидко підлаштовуватися до змін у вебінтерфейсах. **Об'єктом дослідження** є застосування великих мовних моделей (LLM) для створення автоматизованих механізмів збору вебданих, а також дослідження їх потенціалу у генерації високоточних запитів XPath. **Предметом дослідження** виступає модель, орієнтована на збір вебданих, яка передбачає багаторівневу взаємодію між незалежними функціональними модулями системи та забезпечує їх інтеграцію через уніфіковані інтерфейси та стандартизовані формати обміну даними. **Результати.** Запропонована розширена модульна модель системи збору вебданих, яка охоплює всі ключові етапи обробки вебконтенту: від виявлення релевантних джерел інформації, через генерацію та оптимізацію XPath-запитів, до збереження отриманих даних у масштабованій, структурованій базі даних. Запропоноване архітектурне рішення забезпечує високу адаптивність до змін, стабільність функціонування системи, мінімізацію витрат на технічну підтримку. **Висновки.** Використання генеративних мовних моделей для автоматизації створення вебскраперів відкриває нові можливості для гнучкого, точного та стабільного збору вебданих. Такий підхід сприяє ефективній інтеграції систем у мінливе вебсередовище, дозволяючи зменшити часові та фінансові витрати на підтримку інформаційно-аналітичних платформ.

Ключові слова: генеративний штучний інтелект, вебзбирання даних, автоматизація, модульна архітектура, база даних, скрапери, генеративна модель.

Постановка проблеми

Інформаційні технології розвиваються дуже стрімко, впливаючи на всі сфери життя. Однією з основних сучасних технологій є вебскрапінг – процес автоматизованого збирання даних із вебсайтів, який суттєво спрощує отримання, аналіз і використання інформації, є дуже поширеним у бізнесі, ринковій аналітиці, моніторингу конкурентів та інших сферах, даючи змогу автоматизувати процеси збирання даних і мінімізувати витрати на ручну обробку.

На сьогодні вебскрапінг стикається з низкою серйозних перешкод, які обумовлені як технічними, так і правовими змінами в мережі Інтернет. Зростання популярності вебсторінок, що динамічно формуються з використанням JavaScript-фреймворків, ускладнює вилучення даних стандартними засобами. Слід зазначити, що сайти активно впроваджують захист від автоматизованих запитів: антибот-системи, CAPTCHA, обфускацію DOM-структур і часті зміни верстки, що робить скрапінг нестабільним.

© ФІЛІМОНЧУК Т. В., КОПАЙЛО Я. Р., ПАРТИКА С. О., СЕВОСТЬЯНОВА О. М., 2025

Правове середовище також посилено: дотримання регламентних вимог (GDPR і CCPA), а також обмеження, що прописані в угодах користувачів, накладають додаткові бар'єри на автоматизоване збирання інформації. Тому традиційні підходи для вебскрапінгу стають усе менш ефективними, ресурсомісткими та потребують постійного ручного втручання, що створює необхідність у нових, більш гнучких та інтелектуальних підходах, які здатні адаптуватися до умов вебсередовища, що змінюються.

Останні досягнення у сфері штучного інтелекту, зокрема великі мовні моделі (Large Language Models, LLM), значно розширюють можливості автоматизації технологічних процесів. Вони демонструють здатність аналізувати текстові дані, генерувати програмний код, структурувати інформацію та формувати складні правила, базовані на розпізнаванні різних патернів. Завдяки цьому LLM можуть зробити вебскрапінг ще гнучкішим, адаптивним і більш ефективним у роботі з вебданими. Автоматичний аналіз вебсторінок дасть змогу не лише ефективно структурувати інформацію, а й визначати головні закономірності у великих масивах даних. Застосування LLM у цьому процесі забезпечить розширені можливості оптимізації та створення більш ефективних алгоритмів збирання інформації.

Впровадити ці рішення допоможе мова програмування Python, яка пропонує широкий набір бібліотек для вебскрапінгу, обробки даних та інтеграції з LLM. Простий синтаксис, гнучкість і активна спільнота розробників роблять її ідеальним вибором для масштабованих і продуктивних систем. Додаткове використання таких інструментів, як RabbitMQ (система черг повідомлень), Prometheus (система моніторингу) і Grafana Loki (система логування), допоможуть забезпечити надійний обмін даними, підвищити гнучкість архітектури та спростити масштабування систем за необхідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У межах дослідження автоматизованих методів збирання та аналізу вебданих потрібно звернути увагу на низку наукових робіт і статей, що висвітлюють сучасні підходи до вебскрапінгу та обробки інформації. Зокрема, вивчають інструменти на базі мови програмування Python, такі як Scrapy, BeautifulSoup і Selenium, які дають змогу ефективно отримувати, структурувати та аналізувати дані. Особливу увагу приділено ролі штучного інтелекту, включаючи NLP (Natural Language Processing), і машинному навчанню у вдосконаленні процесів обробки текстових і структурованих даних. Також

розглядають технічні аспекти розроблення масштабованих архітектур для збирання даних, включаючи інтеграцію алгоритмів розпізнавання інформації та оптимізацію витрат обчислювальних ресурсів, що є критично важливими для побудови ефективних рішень у динамічному інформаційному середовищі.

У роботі [1] досліджено сучасні підходи для розроблення та впровадження ефективних методів вебскрапінгу для автоматизованого збирання та обробки даних із використанням мови програмування Python. Автори акцентують на застосуванні бібліотек BeautifulSoup, Selenium і Scrapy, що забезпечують високу швидкість і точність отримання інформації з різних вебджерел, зокрема вторинних ринків, особливий на автоматизації процесу за допомогою створення скриптів і використання планувальників завдань, таких як cron, що дає змогу безперервно оновлювати бази даних без втручання людини. Особливо розглянуто методи обробки та очищення зібраних даних, включаючи фільтрацію непотрібної інформації, дублікатів і шумів, що сприяє підвищенню якості даних. Практичне застосування результатів дослідження демонструє їхню цінність для аналізу ринку, оцінювання попиту і прогнозування якості, підкреслюючи важливість запропонованих методів.

У роботі [2] подано всебічний огляд сучасних методів вебскрапінгу та їх застосувань у різних галузях. Автори аналізують основні компоненти вебскрапінгу, включаючи дизайн вебскраперів, та обговорюють різні підходи для збирання даних із вебсайтів. Особливу увагу приділено порівнянню методів вебскрапінгу, таких як парсинг HTML, використання API та автоматизація браузерів, із зазначенням їхньої ефективності та придатності для різних типів вебресурсів. Крім того, розглядають технології, що підтримують процес вебскрапінгу, включаючи мови програмування та фреймворки. Результати дослідження дають корисні рекомендації для науковців і практиків щодо вибору та впровадження оптимальних методів вебскрапінгу для ефективного вилучення та аналізу онлайн-даних.

Також у роботі досліджено застосування методу HTML DOM для вебскрапінгу з метою автоматизованого збору наукових статей із Google Scholar. У дослідженні описано процес ідентифікації специфічних елементів DOM-структури вебсторінок Google Scholar і розроблення скриптів на PHP для ефективного вилучення даних. Зібрану інформацію зберігають у базі даних MySQL, що дає змогу формувати звіти про профілі дослідників, їхні афіліації, кількість цитувань і списки публікацій. Під час експериментів було успішно зібрано значний обсяг даних про дослідників і їхні публікації, що демонструє ефективність запропонованого підходу.

Результати підкреслюють практичну цінність методу для оцінювання наукової діяльності та можуть бути використані для подальшого аналізу продуктивності дослідників та установ.

У роботі [3] досліджено синергію використання мови програмування Python, API та автоматизації для ефективного вебскрапінгу. Автори звертають увагу на застосування бібліотек BeautifulSoup і Scrapy, які спрощують парсинг і вилучення даних із HTML-текстів. Використання API підвищує ефективність процесу, надаючи прямий доступ до структурованих даних та оптимізуючи конвеєр вилучення інформації. Автоматизація процесів дає змогу масштабувати операції скрапінгу, що сприяє швидкому та систематичному збиранню даних із різних джерел. Окремо виділено етичні аспекти вебскрапінгу, зокрема дотримання політик і умов використання вебсайтів. У статті розглянуто найкращі практики та етичні норми, а також наведено реальні приклади застосування вебскрапінгу в академічних дослідженнях, що підкреслює його потенціал для відповідального і сталого використання в наукових цілях.

У роботі [4] висвітлено принципи вебскрапінгу та автоматизації, які спрямовані на створення системи збирання та публікації технічних новин на вебсайті. Автори аналізують застосування інструментів, таких як BeautifulSoup, Selenium і Scrapy, для автоматичного збирання, обробки та збереження даних у структурованих форматах. Окремо розглянуто розроблення інтегрованої системи, що включає логін і реєстрацію користувачів, а також шаблонну сторінку для відображення отриманих новин, що значно покращує доступність актуальної інформації. Запропонована методологія автоматизації процесу демонструє, як можна ефективно оптимізувати збирання даних та оновлення контенту, що є важливим інструментом для конкурентної переваги в динамічному середовищі IT-індустрії.

У роботі [5] розглянуто роль штучного інтелекту у вдосконаленні процесу вебскрапінгу. Авторка детально аналізує сучасні AI-методи, включаючи машинне навчання, обробку природної мови (Natural Language Processing, NLP) і комп'ютерний зір, які допомагають підвищити точність, продуктивність і масштабованість збирання даних із вебресурсів. Окремо досліджено проблеми традиційного вебскрапінгу, зокрема обробку динамічного контенту, механізми захисту сайтів від скрапінгу та обробку неструктурованої інформації. Загальний висновок підкреслює значний потенціал AI у підвищенні ефективності збирання та аналізу вебданих.

У роботі [6] проаналізовано передові методи вебскрапінгу, інтегровані з штучним інтелектом, що

дають змогу значно підвищити точність і ефективність збирання інформації з динамічних вебресурсів. Автори детально розглядають застосування NLP для вилучення основних даних, використання моделей LSTM (Long Short-Term Memory) і трансформерів для аналізу текстових послідовностей, а також CNN (Convolutional Neural Network) для розпізнавання структурних шаблонів у HTML-кодів. Додатково розглянуто алгоритми машинного навчання, такі як SVM (Support Vector Machine) для класифікації контенту, що допомагають адаптуватися до змін вебструктур і обходити механізми захисту від скрапінгу.

Проаналізувавши дослідження та публікації, згадані вище, модель автоматизованої системи вебскрапінгу можна подати як комплексну схему, що охоплює технічні, функціональні та аналітичні аспекти. У середовищі Python така модель може бути описана як набір компонентів

$$ADCM = \{DCM, DPSM, AnM, SCI\}, \quad (1)$$

де DCM (data collection module) – модуль збирання даних;

DPSM (data processing and storage module) – модуль обробки та зберігання даних;

AnM (analytical module) – модуль аналітики;

SCI (system configuration interface) – інтерфейс налаштування системи.

Ця модель забезпечує базову взаємодію між користувачем і системою збирання даних, проте для вирішення більш складних завдань вона не може бути використана і потребує розширення. Наприклад, простота базової моделі не враховує специфічні нюанси інтеграції AI-алгоритмів із традиційними методами обробки даних, що може впливати на стабільність роботи системи та обмежувати можливості її масштабування.

Розроблення моделі вебскрапінгу є складним, багатоетапним процесом, що розпочинається з формування плану та охоплює послідовні фази аналізу, проектування, програмної реалізації й тестування. На кожному з цих етапів головну роль відіграє архітектура моделі, оскільки саме вона визначає логіку реалізації функціональних компонентів, встановлює часові рамки розроблення та формує орієнтовну структуру витрат. Особливої актуальності набуває застосування динамічної архітектури, яка забезпечує гнучкість і масштабованість рішення. Це у свою чергу суттєво

підвищує продуктивність і адаптивність моделі, що є критично важливим у контексті інтеграції модулів вебскрапінгу з сучасними технологіями штучного інтелекту.

Мета дослідження

Метою роботи є вдосконалення моделі автоматизованого вебскрапінгу через інтеграцію сучасних технологій штучного інтелекту та оптимізацію архітектури. Особливу увагу слід приділити адаптивності системи до змін вебресурсів, масштабованості обчислювальних процесів і підвищенню продуктивності за рахунок використання розподілених обчислень.

Викладення основного матеріалу

На основі аналізу сучасних підходів для автоматизованого збирання даних із вебресурсів було виявлено, що чимало робіт зосереджено або на ручному створенні правил для створення скраперів, або на інтерактивних мовних агентах. Такий поділ спричиняє обмеження в масштабуванні, адже традиційні «обгортки» потребують постійного ручного доопрацювання, а агентно-орієнтовані рішення можуть бути надмірно ресурсомісткими і не завжди забезпечують повторне використання створених рішень.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано інтегрувати великі мовні моделі (Large Language Models, LLM) в окремі програмні модулі для прискорення процесів автоматичного створення правил збирання даних, суттєвого підвищення рівня автоматизації та покращення автономності роботи всієї моделі. LLM – це генеративні моделі штучного інтелекту, які навчаються на великому обсязі текстових даних і здатні генерувати текст, програмний код чи правила вилучення інформації на основі вхідних запитів (промптів). Завдяки здатності аналізувати контекст і виявляти складні патерни, LLM демонструють високу точність у створенні алгоритмів і правил для автоматичного вилучення інформації. Якість згенерованого коду та правил дає змогу суттєво знизити кількість помилок, підвищити стабільність роботи і ефективність обробки вебданих. Вибір оптимальної LLM моделі забезпечує максимальну продуктивність і автономність системи, що робить інтеграцію таких моделей перспективним та ефективним рішенням для автоматизації процесів збирання даних.

У зв'язку з цим запропоновано нову модель, яка поєднує генеративні можливості штучного інтелекту (ШІ) з чітко структурованими модулями для вилучення та зберігання даних, що забезпечує гнучкість, адаптивність і масштабованість. Формально запропонована модель може бути описана

за допомогою кортежу

$$ADCM = \{CE, AM, RM, DCM, DPSM, AnM, SCI\}, \quad (2)$$

де CE (control element) – керуючий елемент;

AM (analysis module) – модуль аналізу сайту;

RM (rules module) – модуль генерації правил скрапера.

Перш за все слід зазначити, що модулі з моделі (1) зазнали суттєвих змін. Наприклад, модуль аналітики, який у попередній версії забезпечував лише перегляд інформації, тепер розширено, щоб давати змогу налаштовувати Python-скрипти для обробки даних і генерувати графічне подання зібраної інформації, що значно підвищує аналітичний потенціал системи. Аналогічно модуль збирання даних (DCM) оптимізовано для більш тісної інтеграції з іншими компонентами, що забезпечує швидший зворотний зв'язок через асинхронну взаємодію, а модуль зберігання та обробки даних (DPSM) отримав розширені функції нормалізації та аналізу, що дає змогу працювати з більш складними структурами інформації.

По-друге, до моделі було додано нові модулі, яких не було в початковій версії, що значно розширює її функціональність. Зокрема, додано модуль керуючого елемента (CE), який є центральною ланкою координації між усіма іншими модулями та забезпечує більш ефективний розподіл завдань. Також впроваджено модуль аналізу сайту (AM), завдання якого полягає в попередньому аналізі вебсторінок із метою ідентифікації релевантного контенту, що дає змогу уникнути обробки технічних або повторюваних за структурою сторінок. Нарешті, інтегровано модуль генерації правил (RM), який за допомогою LLM автоматично створює та оптимізує XPath-запити для вилучення даних, що сприяє підвищенню точності збирання інформації. Нові модулі дають моделі змогу не лише оперативно адаптуватися до змін у структурі вебресурсів, забезпечуючи більшу гнучкість, ефективність і масштабованість системи порівняно з першою версією, але і значно підвищують рівень автоматизації всієї моделі, впроваджуючи автоматичне оновлення правил збирання даних, моніторинг ефективності збирання та автоматичного корегування процесів вилучення інформації, що мінімізує потребу ручного втручання та забезпечує безперервну роботу моделі.

Порівняно з традиційними рішеннями запропонована модель дає змогу організувати подієво-орієнтовану систему, яка забезпечує автоматичний аналіз сайтів і виявлення контентних структур на них, автоматизоване вилучення і структурування вебданих, асинхронну взаємодію між модулями через чергу повідомлень, динамічну

генерацію правил збирання контенту на основі LLM, масштабовану обробку HTML-структур та ефективне управління даними у NoSQL-базах даних. Усі модулі використовують мову Python як основну мову програмування.

Керуючий центр (CE) є центральним компонентом модульної архітектури системи, який забезпечує координацію між усіма функціональними елементами, управління процесами та контроль виконання операцій. Його основна мета – забезпечити стабільність, масштабованість і адаптивність роботи системи, гарантуючи узгоджену взаємодію між усіма елементами.

CE складається з кількох основних частин, кожна з яких використовує критично важливий функціонал для роботи всієї інфраструктури. Керуючий елемент побудований на множині складових

$$CE = \{MPS, CM, MS, LS, MS, CS\}, \quad (3)$$

де MPS (message processing service) – сервіс обробки повідомлень;

CM (control mechanism) – механізм управління;

MS (mechanism of synchronization) – механізм синхронізації компонентів;

LS (login service) – сервіс логування;

MS (monitoring service) – сервіс моніторингу системи;

CS (configuration service) – сервіс конфігурації.

Сервіс обробки повідомлень (MPS) є основним елементом комунікаційної інфраструктури системи. Він забезпечує асинхронний обмін даними між компонентами за допомогою механізму черг повідомлень RabbitMQ. Використовуючи підхід подієво-орієнтованої архітектури, система підписана на такі події, як «виявлено новий сайт», «завершено збирання даних» або «помилка з отриманням контенту», та ініціює відповідні реакції без необхідності прямого виклику.

Механізм управління (CM) контролює виконання бізнес-логіки та розподіляє завдання між компонентами відповідно до заданих сценаріїв роботи. Він також відповідає за обробку виняткових ситуацій, що виникають під час роботи, і реалізує механізми автоматичного перезапуску процесів у разі збоїв. Координація виконання завдань відбувається через систему черг повідомлень, що дає змогу

мінімізувати затримки і оптимізувати використання ресурсів. Цей механізм контролює інтерфейс налаштування системи (SCI), який дає змогу задавати правила виконання операцій, налаштовувати пріоритети і визначати параметри масштабування.

Механізм синхронізації компонентів (MS) запобігає конфліктам між сервісами та контролює узгодженість операцій. Він визначає пріоритетність виконання завдань, здійснює балансування навантаження та підтримує цілісність даних між компонентами під час їхньої взаємодії. Завдяки цьому забезпечено коректне виконання паралельних процесів і стабільність функціонування системи.

Сервіс логування (LS) відповідає за збирання, зберігання та аналіз історії подій у системі. Він інтегрований із централізованою системою логування Grafana Loki, щоб ефективно аналізувати лог-файли, знаходити проблемні місця в роботі системи та забезпечувати її стабільну роботу. Логування включає не лише успішні операції, а й помилки та попередження, що дає змогу швидко реагувати на збої та покращувати продуктивність системи.

Сервіс моніторингу системи (MS) забезпечує контроль стану компонентів моделі та дає змогу виявляти аномалії, що можуть вплинути на її продуктивність. Використовуючи систему збирання метрик Prometheus, він відстежує навантаження на сервери, швидкість обробки запитів і доступність сервісів, генерує звіти про стабільність роботи системи та своєчасно реагує на можливі проблеми.

Сервіс конфігурації (CS) забезпечує управління параметрами системи, включаючи визначення списку вебресурсів для збирання даних, налаштування шаблонів парсингу та обмеження для кожного джерела. Конфігураційні файли зберігають у форматі YAML, що забезпечує їхню читабельність і зручність редагування. Завдяки інтерфейсу налаштування системи (SCI) користувач може легко змінювати параметри конфігурації, додавати нові вебресурси до списку для збирання даних і налаштовувати кількість скраперів, що одночасно працюють.

Керуючий центр виступає головною ланкою між усіма компонентами системи, забезпечуючи їхню безперебійну та узгоджену роботу. Завдяки подієво-орієнтованій архітектурі та розподіленій обробці повідомлень він дає змогу легко масштабувати систему, швидко адаптувати її до змін у структурі вебресурсів і гарантувати стабільність її функціонування навіть у високонавантажених середовищах.

Модуль аналізу сайту (AM) є основним елементом процесу автоматизованого збирання даних, що забезпечує проходження по всіх сторінках вебресурсу, ідентифікацію контентних сторінок і

відправлення цієї інформації для подальшої обробки. Його основна функція – визначення, які сторінки містять корисний контент, а які є технічними або інформаційними. Структурно він складається з таких основних компонентів:

$$AM = \{SC, FM, CIS, RTM\}, \quad (4)$$

де SC (site crawler) – механізм обходу сайту;

FM (filtration mechanism) – механізм фільтрації унікальних сторінок;

CIS (classification service) – сервіс класифікації сторінок;

RTM (results transfer mechanism) – механізм передавання результатів.

Механізм обходу сайту (SC) забезпечує ітеративне сканування вебресурсу, переходячи за посиланнями та формуючи карту сторінок. Для цього використано бібліотеку Scrapy, яка дає змогу виконувати швидкий обхід у багатопотоковому режимі. Важливим аспектом є визначення структури сайту і формування списку всіх доступних URL для подальшої обробки.

Механізм фільтрації унікальних сторінок (FM) працює на основі аналізу структури URL та DOM-дерева (Document Object Model), запобігаючи дублюванню аналізу однакових сторінок. Він визначає, які сторінки містять пагінацію або динамічні елементи, та уникає їх повторного розгляду. Це дає змогу оптимізувати обчислювальні ресурси та зменшити кількість запитів до LLM.

Сервіс класифікації сторінок (CIS) використовує LLM для аналізу вмісту сторінки та визначення її типу. Для аналізу застосовують заздалегідь підготовлені prompts (інструкції для мовної моделі), щоб модель могла оцінювати, чи є сторінка контентною або вона містить лише технічну інформацію. На основі цього визначення формують список сторінок, які можуть бути використані для подальшого збору даних.

Механізм передавання результатів (RTM) забезпечує комунікацію з керуючим елементом (CE), надсилаючи інформацію про виявлені контентні сторінки. Після цього CE передає ці дані в модуль обробки та збереження даних (DPSM), де зберігається інформація про релевантні сторінки конкретного вебсайту для подальшого вилучення даних і генерації правил збирання інформації.

Модуль аналізу сайту (AM) є критично важливою частиною системи, оскільки саме він

визначає, з яких сторінок можна отримати корисні дані. Використовуючи ефективний механізм обходу, класифікацію через LLM і систему фільтрації унікальних сторінок, він забезпечує швидке і точне визначення структурованого контенту, необхідного для подальшої автоматизованої обробки.

Модуль створення правил скрапера (RM) відповідає за генерацію, тестування та адаптацію правил для автоматичного вилучення інформації з вебресурсів. Він отримує структуру вебсторінок і генерує правила на основі аналізу їхнього DOM-дерева, використовуючи інтеграцію з великими мовними моделями (LLM). RM забезпечує масштабованість і повторне використання правил, а також адаптацію до змін у структурі вебсайтів:

$$RM = \{RCM, GAM, RVS, RURS\}, \quad (5)$$

де RCM (rule creation mechanism) – механізм створення правил;

GAM (generation analysis mechanism) – механізм аналізу генерації;

RVS (rule validation service) – сервіс валідації правил;

RURS (rule update and reset service) – сервіс оновлення та переналаштування правил.

На першому етапі механізму створення правил (RCM) модуль отримує вхідні дані про структуру вебсторінок і використовує LLM для створення первинних правил скрапінгу. Генеровані правила визначають, як знаходити необхідні дані на сторінках, використовуючи XPath (XML Path Language – мова запитів для навігації по XML/HTML-документах). У цьому процесі застосовано адаптивні алгоритми, що дають змогу створювати як статичні, так і динамічні XPath-запити для вилучення інформації. Використання генеративного штучного інтелекту значно прискорює процес створення XPath-запитів порівняно з ручною генерацією, а також мінімізує вплив людського фактора на точність отриманих результатів. Під час дослідження протестовано кілька моделей LLM (GPT-3.5 Turbo, GPT-4, LLaMA 2, Claude 3), щоб визначити найкраще поєднання ціни та ефективності. Оптимальною за результатами тестів виявилася модель GPT-4, яка продемонструвала високу точність генерації правил і швидке навчання на мінімальній кількості промптів. Щоб забезпечити точність і гнучкість вилучення даних, використовують спеціальні правила (промпти) для LLM. Вони не лише налаштовують LLM для генерації XPath, але й оцінюють їхню ефективність, порівнюючи з уже отриманими шаблонами. Окремі промпти налаштовані на оптимізацію згенерованих шляхів, виправлення помилок та узгодження із загальними шаблонами структури сайту. Особливістю

роботи з LLM є здатність моделі не лише автоматично генерувати XPath, а і самостійно ідентифікувати патерни та залежності у DOM-структурі сторінок, що забезпечує високу адаптивність до змін структури вебсайтів.

Процес генерації XPath заснований на підході багатоступінчастої побудови правил: спочатку створюють базові запити, після чого система ітеративно аналізує HTML-структуру та оптимізує їх під конкретний сайт. Якщо згенеровані XPath-запити виявляються неефективними або повертають некоректні дані, система автоматично застосовує метод *step-back generation* (покрокового відкату) для повернення до попереднього стану генерації та корегування параметрів. Це дає змогу покроково тестувати кожен етап побудови XPath-запитів, виявляти вузькі місця в логіці генерації та адаптувати правила до змін у структурі вебсторінки. Такий підхід дає змогу мінімізувати випадкові помилки та підвищити стабільність роботи скрапера навіть зі зміною структури вебсторінок. Завдяки інтеграції LLM система може швидко визначати, на якому саме етапі генерації XPath виникла помилка, а також автоматично пропонувати варіанти виправлення на основі попереднього досвіду.

Механізм аналізу генерації (GAM) – наступний інструментарій, де перевіряють узгодженість згенерованих правил із реальними вебсторінками. Використовуючи набір тестових сторінок, система перевіряє правильність знаходження контенту, визначаючи, чи виділено потрібні елементи. Якщо виявлено некоректні елементи, система корегує правила перед подальшим використанням. Тут важливу роль також відіграє генеративний штучний інтелект, який дає змогу автоматизовано аналізувати результати тестування та класифікувати помилки за типами, що спрощує їх подальше виправлення.

Після успішного аналізу виконують валідацію правил за допомогою відповідного сервісу (RVS), де тестують правила на ширшому наборі сторінок сайту. Це забезпечує генерацію універсальних правил, які можна застосовувати для всіх подібних сторінок. Додатково перевіряють на стабільність і стійкість правил до незначних змін у HTML-структурі.

Завершальний етап – виклик сервісу оновлення та переналаштування правил (RURS). Якщо під час реального скрапінгу виникають помилки, або структура сторінки змінилася, система автоматично передає правила на доопрацювання. Оновлені правила перевіряють за тим самим алгоритмом і в разі успішного проходження тестів зберігають у модулі збереження даних (DPSM) для подальшого використання.

Механізм створення правил є критично важливим компонентом системи збирання даних,

оскільки дає змогу автоматизувати адаптацію скрапінгових правил і забезпечує високу ефективність вилучення даних навіть у динамічних вебсередовищах.

Модуль збирання даних (DCM) забезпечує автоматизований і масштабований процес вилучення інформації з вебресурсів відповідно до згенерованих правил. Його основна мета – обробка отриманих правил, вилучення даних і передавання їх для подальшої обробки. DCM взаємодіє з іншими модулями системи, отримуючи правила через керуючий елемент (CE), збираючи дані та передаючи їх у модуль обробки і збереження даних (DPSM). У разі виникнення помилок під час вилучення контенту DCM повідомляє про це CE, що дає змогу оновити правила в модулі генерації правил (RM). Модуль зберігання даних складається з таких компонентів:

$$DCM = \{REM, MM, DGS, DTM\}, \quad (6)$$

де REM (rule enforcement mechanism) – механізм виконання правил;

MM (multithreading mechanism) – механізм багатопотокової обробки;

DGS (data gathering service) – сервіс збирання даних;

DTM (data transmission mechanism) – механізм передавання даних.

Механізм виконання правил (REM) є початковим етапом, на якому модуль отримує збережені в DPSM правила збирання контенту і застосовує їх для цільових вебсторінок. Використання XPath-селекторів та інших параметрів дає змогу точно ідентифікувати і вилучати необхідні дані з кожної вебсторінки. У разі невідповідності результатів система передає звіт у CE, який ініціює корегування правил через RM.

Механізм багатопотокової обробки (MM) забезпечує паралельне збирання даних із вебсторінок, що значно прискорює процес скрапінгу. Завдяки використанню Scrapy та асинхронного підходу система може обробляти десятки запитів одночасно, динамічно регулюючи швидкість обходу для запобігання блокуванню серверів.

Сервіс збирання даних (DGS) відповідає за вилучення та структурування отриманої інформації. Витягнута інформація може містити текст, зображення, метадані та інші об'єкти вебсторінок. Дані зберігають у проміжному форматі (JSON), після чого передають на подальшу обробку.

Передавання даних здійснюється через RabbitMQ, що забезпечує ефективний обмін

інформацією між DCM і DPSM. У разі виявлення помилок або змін у структурі сайту DCM генерує відповідний івент і надсилає його до CE, який перенаправляє його в RM для оновлення правил.

Отже, DCM відіграє важливу роль у процесі автоматизованого збирання даних, забезпечуючи точність, адаптивність і ефективну інтеграцію з іншими модулями системи. Він виконує функції обходу, видалення та передавання інформації, використовуючи заздалегідь визначені правила для отримання релевантного контенту.

Модуль обробки та збереження даних (DPSM) є центральним компонентом системи, що відповідає за нормалізацію, структурування та збереження отриманої інформації. Він забезпечує підтримку всіх даних, використовуваних у процесі збирання та аналізу вебконтенту, включаючи правила видалення, унікальні сторінки, метаінформацію вебресурсів і сам контент. DPSM виконує критично важливу роль у підтримці цілісності даних і забезпечує швидкий доступ до необхідної інформації для інших модулів системи. Основною базою даних для DPSM є MongoDB, оскільки вона забезпечує гнучкість, масштабованість і ефективну обробку неструктурованих даних. Використання NoSQL-бази виправдане через динамічний характер збереження інформації, зокрема правил видалення, структур вебсторінок і контентних даних. MongoDB дає змогу зберігати документи у форматі JSON, що спрощує роботу із вкладеними структурами та забезпечує швидкий доступ до потрібних елементів. Взаємодія з базою здійснюється через бібліотеку PyMongo, яка надає інструменти для CRUD-операцій (create, read, update and delete), налаштування індексів та оптимізації запитів, щоб підвищити продуктивність системи. DPSM складається з таких компонентів:

$$DPSM = \{DCIM, NM, TS, SCM, AdM, CM, IS\}, \quad (7)$$

де DCIM (data cleansing mechanism) – механізм очищення даних;

NM (normalization mechanism) – механізм нормалізації форматів;

TS (transfer service) – сервіс передавання даних;

SCM (schema creation mechanism) – механізм створення схеми;

AdM (adaptation mechanism) – механізм адаптації структури;

CM (control mechanism) – механізм контролю даних;

IS (integration service) – сервіс інтеграції даних.

Механізм очищення даних (DCIM) забезпечує видалення зайвих символів, небажаних HTML-тегів, дублікатів і некоректних записів. Він використовує алгоритми фільтрації, регулярні вирази та автоматичне виправлення помилок у структурі даних, що підвищує їхню якість перед збереженням.

Механізм нормалізації форматів (NM) приводить дані до єдиного узгодженого вигляду, очищує текст від зайвих пробілів, змінює регістри символів, форматує числові значення і дати у стандартний вигляд (ISO), забезпечуючи узгодженість у всій системі.

Сервіс передавання даних (TS) здійснює комунікацію з іншими модулями через керуючий елемент (CE). DPSM отримує структуровані дані, обробляє їх і надсилає у відповідні сховища або передає в інші модулі системи для подальшого аналізу та використання.

Механізм створення схеми (SCM) визначає структуру для NoSQL-базы MongoDB, автоматично формуючи схему збереження та забезпечуючи її відповідність вимогам системи. Зі створенням схеми враховують типи отриманих даних, їхню ієрархію та можливість динамічного розширення, що забезпечує масштабованість системи без необхідності ручного оновлення.

Механізм адаптації структури (AdM) оновлює схему бази з виявленням нових атрибутів у вхідних даних, що дає змогу підтримувати гнучкість і розширюваність системи, адаптуючи її до зміни вхідного контенту.

Механізм контролю даних (CM) відповідає за перевірку цілісності та валідності інформації, запобігаючи дублюванню або втраті даних, перевіряє коректність форматів, відповідність заданій структурі та відсіює помилкові або неповні записи.

Сервіс інтеграції даних (IS) забезпечує можливість швидких агрегатних запитів, обробки великих обсягів інформації та синхронізації даних із зовнішніми системами, дає змогу аналізувати інформацію в реальному часі, забезпечуючи її доступність для аналітичних модулів.

Отже, DPSM виконує повний цикл обробки, нормалізації та збереження даних, забезпечуючи їхню чистоту, узгодженість і ефективну інтеграцію в загальну систему збирання та аналізу інформації.

Аналітичний модуль (AnM) відповідає за генерацію аналітичних звітів у форматі PDF, використовуючи дані з DPSM. Він інтегрує LLM для автоматичного формування аналітичних скриптів і візуалізації даних через бібліотеки Python. Основне завдання модуля аналітики – отримання необхідної

інформації, її обробка та подальша візуалізація у вигляді графіків, таблиць та узагальнень, які зберігаються у PDF-документах. Користувач взаємодіє з модулем через інтерфейс налаштування системи (SCI), де користувач задає параметри звіту у вигляді текстового опису аналітики, яку він хоче отримати. Після цього LLM аналізує запит, генерує відповідний Python-скрипт для обробки необхідних даних і формує аналітичний документ у форматі PDF. Модуль аналітики складається з таких компонентів:

$$AnM = \{DQM, SM, DVS, GS\}, \quad (8)$$

де DQM (data query mechanism) – механізм запиту даних;

SM (script mechanism) – механізм створення скриптів;

DVS (data visualization service) – сервіс візуалізації даних;

GS (generation service) – сервіс генерації PDF.

Механізм запиту даних (DQM) ініціює отримання інформації з DPSM через керуючий елемент (CE). Спочатку він запитує структуру доступних даних для вибраного вебресурсу, після чого надсилає запит на отримання конкретних значень для подальшої обробки, що дає змогу модулю формувати коректні запити на аналітику.

Механізм створення скриптів (SM) використовує LLM для формування Python-скриптів, які виконують аналіз отриманих даних. Спеціалізований системний промпт дає змогу LLM адаптувати код до конкретного запиту, оптимізуючи його під вимоги аналітичного процесу. Автоматично згенерований скрипт виконано в ізольованому середовищі, забезпечуючи безпеку та коректність аналізу.

Сервіс візуалізації даних (DVS) відповідає за обробку результатів аналізу та побудову графіків, діаграм і таблиць. Для цього використовують бібліотеку Matplotlib та інші інструменти візуалізації Python. Отримані візуальні зображення формують відповідно до запиту користувача.

Сервіс генерації PDF (GS) створює фінальний звіт у PDF-форматі, включаючи текстові узагальнення, отримані графіки та таблиці. Весь контент структуровано за допомогою спеціалізованого системного промпту, який адаптує розміщення елементів відповідно до логіки звіту. Генерація документа відбувається автоматично після завершення аналізу.

Отже, модуль аналітики забезпечує повний цикл: від отримання даних до їх обробки та

формування PDF-звітів. Його інтеграція з LLM дає змогу динамічно адаптувати запити і автоматизувати створення аналітичних матеріалів, що значно підвищує ефективність роботи системи.

Інтерфейс налаштування системи (SCI) є центральним компонентом для управління та контролю всієї моделі. Це консольний інтерфейс, що забезпечує взаємодію користувача із системою через набір команд. Основна функція SCI – управління обробкою сайтів, налаштування параметрів збирання даних, контроль ресурсів і генерація аналітичних звітів на основі отриманої інформації. SCI складається з таких компонентів:

$$SCI = \{PCM, CM, RGM\}, \quad (9)$$

де PCM (processing control mechanism) – механізм управління обробкою;

CM (configuration mechanism) – механізм конфігурації обробників;

RGM (report generation mechanism) – механізм генерації звітів.

Механізм управління обробкою (PCM) відповідає за додавання нових сайтів у процес збирання даних. Користувач може передавати списки сайтів, задавати параметри скрапінгу та визначати правила обробки для кожного ресурсу. Запити на обробку надходять на керуючий елемент (CE), який координує їх виконання між іншими модулями.

Механізм конфігурації обробників (CM) дає змогу задавати кількість активних процесів збору даних, встановлювати ліміти на використання ресурсів та управляти параметрами виконання завдань. Це забезпечує гнучкість і оптимізацію системи під різні навантаження.

Механізм генерації звітів (RGM) ініціює створення аналітичних документів на основі отриманих даних. Він взаємодіє з модулем аналітики, передаючи запити на створення PDF-звітів. Користувач задає параметри аналітики в текстовому форматі, після чого система автоматично формує відповідний звіт.

Отже, інтерфейс налаштування системи забезпечує гнучке управління всією моделлю, даючи змогу користувачам налаштовувати обробку сайтів, контролювати ресурси та ініціювати створення аналітичних матеріалів у зручному консольному форматі.

Результати та їх обговорення

Розглянемо декілька прикладів використання великих мовних моделей LLM для підвищення ефективності вебскрапінгу.

Приклад 1: збирання даних про товари з п'яти великих e-commerce платформ. З використанням традиційного підходу процес потребує значних ресурсів: зазвичай задіяні два розробники, які витрачають близько трьох днів на написання та налагодження аналітичного аналізатора (парсера). Такий підхід передбачає створення понад тисячі рядків коду мовою Python із використанням інструментів типу Scrapy і XPath. За будь-якої зміни в структурі хоча б одного сайту необхідне ручне доопрацювання, що робить процес трудомістким і таким, що слабо масштабований.

Альтернативний шлях із застосуванням моделей LLM дає змогу радикально спростити завдання. Замість команди розробників достатньо одного фахівця, який за один день за допомогою Python-скрипту та виклику моделі LLM може обробити HTML-сторінки та отримати потрібну інформацію. При цьому промт легко адаптований до всіх п'яти сайтів без необхідності змінювати код. Такий підхід скорочує трудомісткість до 70 % та значно знижує технічний поріг: тепер цю роботу може виконати не розробник, а аналітик.

Приклад 2: класифікація відгуків користувача за тональністю є однією із найчастіших завдань в e-commerce та клієнтській аналітиці. Традиційно його вирішують за допомогою машинного навчання: команда з одного-двох ML-інженерів витрачає близько п'яти днів на збирання та розмітку навчальної вибірки, попередню обробку тексту, навчання моделі (наприклад на базі scikit-learn або Hugging Face) і налаштування всього пайплайну. Такий підхід потребує наявності якісних даних, часу на експерименти з гіперпараметрами, а зі зміною предметної сфери – повного перенавчання моделі.

Використання LLM (наприклад GPT-4) робить процес простішим і швидшим. Один спеціаліст із базовими навичками Python за день може реалізувати скрипт, який надсилає текст відгуків до LLM із заздалегідь підготовленим промтом. Така схема не потребує навчання моделі та адаптується до різних тематик товарів без додаткового налаштування, що дає змогу скоротити витрати часу до 80 % і виконати завдання силами не інженерів, а маркетолога чи аналітика.

Приклад 3: завдання вилучення основних даних (назва компанії, дата, сума та ПІН із сканів договорів та актів) традиційно потребує чималих ресурсів. Зазвичай до роботи залучені двоє розробників і аналітик, а весь процес займає від тижня до десяти днів. Використовують інструменти для OCR (наприклад Tesseract), після цього набір

регулярних виразів і кастомних шаблонів під конкретні формати документів. Для будь-якої зміни структури документа потрібне ручне доопрацювання коду.

З використанням LLM, таких як GPT-4, завдання вирішують швидше та простіше. Один спеціаліст, навіть без глибоких навичок програмування, може за один-два дні вирішити це завдання: текст документів розпізнають через стандартний OCR, потім передають до GPT-моделі з універсальним промтом. Використовуючи таке рішення, немає необхідності писати складні правила або регулярні вирази, тому що модель сама адаптується до різних форматів і стилів оформлення документів. У результаті досягають близько 75 % економії часу, знижується технічний поріг із рівня команди розробників до рівня офіс-аналітика чи юриста.

У таблиці та на рисунку наведено порівняння традиційного вебскрапінгу (синім кольором) і вебскрапінгу з використанням мовних моделей LLM (помаранчевим кольором) за основними метриками: швидкість налаштування, стійкість, точність, обсяг коду та загальний час.

Таблиця

Порівняння підходів вебскрапінгу

Метрика порівняння	Підхід	
	традиційний	з LLM
1. Час налаштування, год	3	0,5
2. Частота поломок, %	40	10
3. Точність вилучення, %	85	97
4. Код, рядки	300	40
5. Загальний час, год	40	12

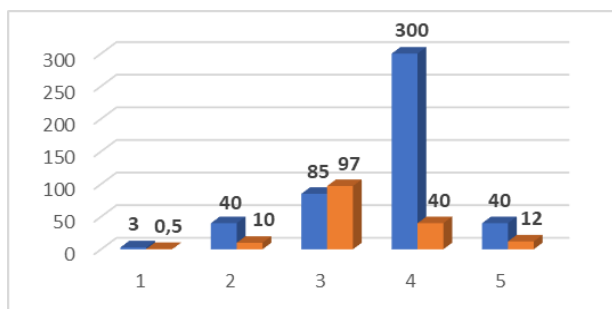


Рис.

Наведені приклади доводять, що використання мовних моделей LLM радикально спрощують і прискорюють рутинні завдання, для яких раніше потрібна була участь розробників або фахівців із машинного навчання. Загальна вигода від використання LLM є очевидною: економія часу – до 70-80 %, зниження технічного порогу з рівня розробника до рівня аналітика чи предметного експерта, підвищення гнучкості за рахунок використання промтів, які працюють відразу для різних вхідних даних без необхідності доопрацювання коду. Усі ці переваги відкривають нові можливості для автоматизації бізнес-процесів у тих сферах, де раніше були потрібні ресурсоємні технічні рішення.

Висновки

Проведений аналіз показав, що запропонована модульна архітектура вебскрапінгової системи значно перевершує сучасні рішення за основними параметрами: ефективністю, масштабованістю і адаптивністю. Використання подієво-орієнтованого підходу забезпечує асинхронну взаємодію між компонентами моделі, мінімізуючи затримки та підтримуючи безперервну роботу системи.

Основною перевагою запропонованої моделі порівняно з попередньою (1) є автоматизація процесу створення скраперів завдяки інтеграції великих мовних моделей (LLM), що дає змогу швидко генерувати правила для вилучення інформації, суттєво знижуючи потребу в ручному втручанні. Для підтвердження цього було проведено експеримент, у якому проаналізовано набір із 10 вебмагазинів. У рамках цього експерименту встановлено, що використання традиційної моделі, яка передбачає ручне розроблення скраперів, потребувало в середньому близько 8-12 годин роботи одного спеціаліста для кожного сайту. Натомість запропонована модель дала змогу автоматично генерувати повністю функціональні правила для збирання аналогічної інформації за 20-30 хвилин, що скорочує час розроблення більш ніж у 16 разів.

Крім швидкості, якість і точність зібраних даних у запропонованій моделі також суттєво покращені завдяки адаптивності до змін у структурі

вебсторінок. Це забезпечують механізми автоматичної генерації та оновлення XPath-запитів, що дає змогу оперативно реагувати на зміни структури контенту. Використання MongoDB як масштабованої бази даних підвищує швидкість доступу до збережених даних, даючи змогу ефективно працювати з великими обсягами інформації.

Отже, запропонована модель не лише скорочує витрати часу та ресурсів на розроблення скраперів, але й забезпечує високу якість, гнучкість і стабільність у роботі. Вона може бути ефективно застосована в широкому спектрі завдань, включаючи маркетингову аналітику, моніторинг конкурентів, дослідження штучного інтелекту та інші галузі, для яких потрібне швидкі та точні збирання структурованих вебданих.

Список використаних джерел

1. Січкарюк Р. К., Корніловська Н. В., Лур'є І. А., Вороненко М. О. Розробка та впровадження ефективних методів вебскрапінгу для автоматизованого збору і обробки даних з використанням Python. *Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформатика. Культура. Техніка»*. Одеса: Національний університет «Одеська політехніка», Інститут комп'ютерних систем. 2024. Т. 1, № 1. С. 62-68. doi: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.08>.
2. Lotfi C., Srinivasan S., Ertz M., Latrous I. Web Scraping Techniques and Applications: A Literature Review. *SCRS Conference Proceedings on Intelligent Systems*. 2021. P. 381-394. doi: <https://doi.org/10.52458/978-93-91842-08-6-381>.
3. Pandey K., Tale C., Yere T., Rajeshirke R., Jadhav R. Web Scraping: Leveraging the Power of Python, APIs, and Automation. *International Journal of Novel Research and Development*. 2024. Vol. 9, Iss. 3. P. b383-b389. URL: <https://www.ijnrd.org/papers/IJNRD2403143.pdf>.
4. Bhute T., Raut S., Kannake S., Guda B., Sheikh M. Web Scraping and Automation. *International Journal of Creative Research Thoughts*. 2024. Vol. 12, Iss. 5. P. 285-290.
5. Weerasinghe K., Maduranga M.W.P., Kawya M.M.V.T. Enhancing Web Scraping with Artificial Intelligence: A Review. *4th Research Symposium of Faculty of Computing*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379024314_Enhancing_Web_Scraping_with_Artificial_Intelligence_A_Review.
6. Huang C.-J. The Synergy of Automated Pipelines with Prompt Engineering and Generative AI in Web Crawling. 2024.

doi:10.48550/arXiv.2502.15691. URL: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://www.arxiv.org/pdf/2502.15691.

T. Filimonchuk, Y. Kopailo, S. Partyka, O. Sevostianova

Model of automated data collection from web resources based on generative artificial intelligence

Abstract. The relevance of the research lies in the fact that, under the current conditions of rapid digitalization, global internet development, and the continuous growth of data volumes obtained from various web resources, there is an increasing need to develop efficient tools for automated data collection, analysis, and structuring. Web scraping has become an integral part of information support processes across many industries. However, traditional data collection methods often require complex manual configurations, which complicate system scalability and hinder timely adaptation to changes in website structures. Therefore, the use of universal rules and algorithms for building web scrapers is becoming particularly relevant. A key role in this process is played by modern large language models (LLMs), which are capable of generating adaptive solutions, particularly in the form of dynamic XPath expressions used to efficiently extract relevant data from the HTML structure of web pages. This approach enables the creation of scalable and self-learning web data collection systems that can adapt to various content formats and quickly respond to changes in web interfaces. **The object of the study** is the application of large language models (LLMs) in developing automated mechanisms for web data collection, as well as exploring their potential in generating high-precision XPath queries. **The subject of the study** is a model focused on web data collection that involves multi-level interaction between independent functional modules and ensures their integration through unified interfaces and standardized data exchange formats. **Results.** The proposed extended modular model of the web data collection system covers all key stages of web content processing: from identifying relevant information sources, through generating and optimizing XPath queries, to storing the extracted data in a scalable, structured database. The proposed architectural solution ensures high adaptability to changes, system stability, and minimized technical support costs. **Conclusions.** The use of generative language models for automating the creation of web scrapers opens up new possibilities for flexible, accurate, and stable web data collection. This approach facilitates the effective integration of such systems into dynamic web environments, reducing both time and financial costs associated with maintaining information and analytical platforms.

Keywords: generative artificial intelligence, web data collection, automation, modular architecture, database, scrapers, generative model, large language model.

Філімончук Тетяна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: tetiana.filimonchuk@nure.ua. ORCID: 0000-0002-4380-504X.

Копайло Ярослав Русланович, магістрант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: yaroslav.kopailo@nure.ua.

Партика Станіслав Олександрович, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: stanislav.partyka@nure.ua. ORCID: 0000-0002-7376-8980.

Севостьянова Олена Миколаївна, старший викладач, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: olena.sevostianova@nure.ua. ORCID: 0009-0008-2595-5133.

Tetiana Filimonchuk, PhD, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: tetiana.filimonchuk@nure.ua. ORCID: 0000-0002-4380-504X.

Yaroslav Kopailo, master's student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: yaroslav.kopailo@nure.ua.

Stanislav Partyka, Senior Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: stanislav.partyka@nure.ua. ORCID: 0000-0002-7376-8980.

Olena Sevostianova, Senior lecturer, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine. E-mail: olena.sevostianova@nure.ua. ORCID: 0009-0008-2595-5133.

Канд. техн. наук. ШУЛЬДІНЕР Ю. В, асп. ПЕТРИК С. В.
(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення функціонування ланцюгів доставлення вантажів на основі моделей мультимодальних перевезень

Анотація. У сучасних умовах глобалізації та розвитку міжнародної торгівлі мультимодальні перевезення відіграють головну роль у забезпеченні ефективності логістичних процесів. Завдяки ним можна оптимізувати маршрути, мінімізувати витрати і скоротити час доставлення, проте є деякі інфраструктурні, екологічні та організаційні проблеми. Дослідження спрямоване на розроблення оптимальних підходів для планування мультимодальних перевезень вантажів із використанням математичних моделей транспортної оптимізації.

Проаналізовано сучасні моделі мультимодальних перевезень, визначено їхні основні переваги та недоліки. Запропоновано математичну модель оптимізації логістичних процесів, що враховує витрати, час транспортування та пропускну спроможність транспортних вузлів. Розглянуто перспективи впровадження цифрових технологій для підвищення ефективності координації між перевізниками. Використання запропонованої моделі дає змогу значно зменшити витрати на перевезення, мінімізувати затримки та покращити екологічні показники мультимодальних маршрутів. Інтеграція цифрових платформ і розвиток мультимодальних терміналів сприятиме підвищенню ефективності управління логістичними системами.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, логістика, транспортна оптимізація, цифрові технології, екологічна стійкість.

Вступ.

У сучасних умовах глобалізації та розвитку міжнародної торгівлі ефективність ланцюгів доставлення вантажів є основним фактором для забезпечення безперебійного постачання товарів. Мультимодальні перевезення, які поєднують кілька видів транспорту [1], дають змогу мінімізувати витрати, оптимізувати логістичні процеси та підвищити швидкість доставлення. Впровадження новітніх технологій і вдосконалення логістичної інфраструктури сприяє зменшенню ризиків, пов'язаних із нестабільністю маршрутів і зміною ринкової кон'юнктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми вдосконалення транспортно-логістичних систем, сучасних методів перевезення вантажів, організації комбінованих перевезень, а також розвитку мультимодальних та інтермодальних транспортних схем широко висвітлено в працях українських і зарубіжних науковців. Значний внесок у дослідження цих питань зробили О. Бакаєв, Р. Вернигора [2], М. Григорак, І. Іртищева [3], О. Кухарчик, С. Милославська, А. Огороков [2], О. Павленко, А. Пасічник [4], О. Полякова, К. Плужников, В. Караваєв, В. Назаренко, Л. Савченко, Н. Троїцька, А. Чубуков, О. Шраменко та інші.

Результати проведених досліджень свідчать про наявність наукових праць, присвячених вивченню мультимодальних контейнерних перевезень, аналізу якості логістичних послуг і впливу залізничного транспорту на ефективність цих перевезень [5, 6]. Підтверджено, що залізничний транспорт відіграє головну роль у мультимодальній логістиці, оскільки є екологічно безпечним, економічно вигідним і швидким способом транспортування вантажів. Вивчено методи оптимізації управління логістичними ланцюгами постачання у країнах Європейського Союзу, однак недостатньо досліджено їхній вплив на контейнерні вантажоперевезення.

Актуальним залишається питання впровадження сучасних логістичних технологій, спрямованих на зменшення витрат ресурсів у мультимодальних транспортних системах. Крім того, особливу цінність для України становлять дослідження, що стосуються оптимізації вантажопотоків у напрямку Україна – Європа на основі мультимодальних маршрутів. Важливим є і вплив транснаціональних корпорацій на глобальну економіку, що підкреслює необхідність ефективної взаємодії між різними видами транспорту. Отже, розвиток мультимодальних перевезень розглянуто не лише як важливий елемент транспортної галузі, а і стратегічний фактор економічного зростання держав.

Визначення мети та завдання дослідження.

Основною метою дослідження є розроблення оптимальних підходів для планування

©ШУЛЬДІНЕР Ю. В, ПЕТРИК С. В., 2025

мультимодальних перевезень вантажів шляхом застосування математичних методів вирішення транспортних завдань. Використання точних моделей дасть змогу підвищити ефективність логістичних процесів, мінімізувати витрати і скоротити час доставлення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- детальний аналіз різновидів моделей мультимодальних перевезень;
- дослідження основних елементів мультимодальної логістики та визначення показників ефективності перевезень;
- взаємозв'язок між різними параметрами мультимодальних транспортних процесів.

Реалізація цих завдань сприятиме вдосконаленню механізмів управління мультимодальними перевезеннями та забезпеченню ефективного використання ресурсів у логістичних системах.

Мультимодальні перевезення є основним елементом сучасної логістики, проте їхня ефективність обмежена низкою проблем. Насамперед інфраструктурні обмеження, зокрема недостатня кількість сучасних мультимодальних терміналів, обмежена пропускна спроможність транспортних вузлів і слабка інтеграція різних видів транспорту, призводять до затримок і збільшення вартості перевезень. На додачу складність координації між різними перевізниками та відсутність єдиної цифрової платформи управління ускладнюють процеси моніторингу і планування маршрутів. Високі витрати на перевантаження, затримки в портах і на митниці, а також бюрократичні бар'єри ще більше ускладнюють процес транспортування вантажів у міжнародних масштабах.

Крім того, під час мультимодальних перевезень стикаються з викликами, пов'язаними з екологічною стійкістю і цифровою трансформацією. Велика частка автомобільного транспорту в мультимодальних ланцюгах призводить до підвищення викидів CO₂, тоді як використання більш екологічних рішень, таких як залізничний і річковий транспорт, залишається недостатнім. Відсутність автоматизованих систем управління, блокчейну для цифрового документообігу і штучного інтелекту для оптимізації маршрутів уповільнює процеси перевезень і призводить до неефективного використання ресурсів. Для вирішення цих проблем необхідно впроваджувати інтегровані цифрові рішення, розвивати інфраструктуру мультимодальних терміналів і стимулювати використання екологічно чистих видів транспорту, що дасть змогу зробити мультимодальні перевезення більш ефективними, доступними і стійкими.

Основна частина дослідження.

У логістиці мультимодальних перевезень використовують різні комбінації видів транспорту для забезпечення максимальної ефективності доставлення

вантажів. Основними моделями мультимодальних перевезень є:

- повітряно-морські перевезення (Sea-Air transport). Ця модель поєднує економічність морських перевезень і швидкість авіаційного транспорту, що дає змогу значно скоротити час доставлення порівняно з чисто морськими маршрутами, при цьому знижуючи витрати порівняно з повністю авіаційним перевезенням, застосовувана переважно для транспортування високовартісних і швидкопсувних товарів, таких як електроніка, одяг і взуття;

- автомобільно-повітряні перевезення (Road-Air transport). Така схема передбачає комбіноване використання автомобільного та авіаційного транспорту: вантажі спочатку транспортують автотранспортом до аеропорту або після прибуття авіарейсом розподіляють до кінцевого пункту призначення; вона ефективна для швидкого доставлення вантажів у регіони, де немає прямих авіасполучень;

- автомобільно-залізничні перевезення (Rail-Road transport). Поєднання надійності та екологічності залізничного транспорту із гнучкістю і мобільністю автоперевезень робить цю модель однією з найпоширеніших. Її активно використовують у США та країнах Європи, де добре розвинена залізнична інфраструктура. Найчастіше вона застосовувана для перевезення контейнеризованих вантажів між логістичними центрами;

- комбінована модель «залізничний – автомобільний – внутрішній водний – морський транспорт» (Rail-Road-Inland Waterway-Sea transport). Ця схема забезпечує глобальну логістичну підтримку міжнародної торгівлі. Вантажі спочатку транспортують залізницею, автомобільним або внутрішнім водним транспортом у країні-відправнику, після чого відправляють морським шляхом у порт країни-імпортера, звідки знову розподіляють наземними видами транспорту до кінцевого отримувача. Такий підхід широко застосовують для перевезення великих партій товарів, включаючи промислову продукцію та сировину;

- модель «сухопутний міст» (Land Bridge transport). Ця концепція передбачає з'єднання двох морських маршрутів сухопутним транспортом між портами, розташованими на різних континентах. Найчастіше для цього використовують залізничний транспорт, що дає змогу знизити загальний час перевезення. Таку схему застосовують, наприклад, для транспортування вантажів між Азією та Європою через територію Євразії або між східним і західним узбережжям Північної Америки.

Узагальнену схему організації мультимодальних перевезень подано на рис. 1.

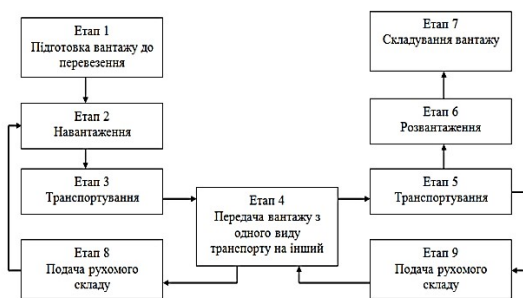


Рис. 1. Узагальнена схема здійснення мультимодальних перевезень

На рис. 2 зображено розподіл мультимодальних перевезень за видами транспорту. Діаграма демонструє, що найбільшу частку (35 %) складають автомобільно-залізничні перевезення (Rail-Road transport). Такий розподіл пояснюють тим, що залізничний транспорт забезпечує високу вантажопідйомність, економічну ефективність та екологічну безпечність, тоді як автомобільний транспорт додає гнучкості на коротких дистанціях. Ця модель активно використовується у країнах з добре розвинутою залізничною інфраструктурою, зокрема Європі, США та Китаї.

Другу за значущістю групу становлять комбіновані маршрути, що включають залізничний, автомобільний, внутрішній водний і морський транспорт (Rail-Road-Inland Waterway-Sea transport), які охоплюють 25 % мультимодальних перевезень. Вони є основними для міжнародної торгівлі, оскільки дають змогу ефективно транспортувати великі партії вантажів на далекі відстані. Особливо поширене їх використання в міжнародній логістиці між континентами.

Модель «сухопутний міст» (Land Bridge transport) займає 20 % мультимодальних перевезень. Завдяки їй можна оптимізувати час доставлення між різними частинами світу за рахунок використання залізничного транспорту для сполучення між портами, розташованими на різних континентах. Ця схема особливо популярна для перевезень між Азією та Європою, а також у Північній Америці, де вона допомагає зменшити навантаження на морські маршрути.

Незначну частку займають повітряно-морські (Sea-Air transport) і автомобільно-повітряні (Road-Air transport) мультимодальні перевезення – 10 % кожен. Хоча авіатранспорт забезпечує максимальну швидкість доставлення, його висока вартість значно обмежує використання в мультимодальних схемах. Тим не менш ці моделі застосовуються для перевезення високовартісних і швидкопсувних товарів, таких як електроніка, фармацевтичні препарати, одяг і взуття.

Використання основних моделей мультимодальних перевезень

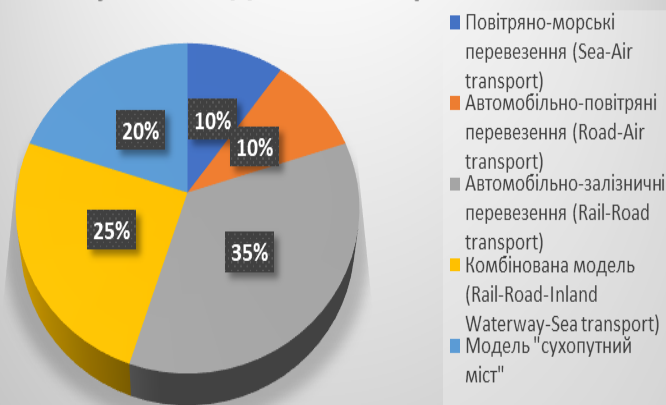


Рис. 2. Розподіл за використанням основних моделей мультимодальних перевезень

Аналіз розподілу мультимодальних перевезень свідчить, що найбільш популярними є моделі поєднання залізничного та автомобільного транспорту, а також комбіновані міжнародні маршрути з використанням морських перевезень. Це пояснюють їхньою економічною ефективністю, високою вантажопідйомністю та оптимальним співвідношенням вартості й часу доставлення. Водночас використання авіаційного транспорту в мультимодальних перевезеннях залишається обмеженим через високу собівартість, але все ж таки відіграє важливу роль у транспортуванні термінових і дорогих вантажів. Отримані результати підкреслюють необхідність подальшого розвитку інфраструктури мультимодальних перевезень, зокрема вдосконалення залізничної та морської логістики, інтеграції цифрових технологій для покращення управління перевезеннями і стимулювання екологічно чистих рішень у транспортній галузі.

Розвиток мультимодальних перевезень в Україні розглядають як стратегічно важливий напрям для зміцнення національної транспортної системи, щоб суттєво збільшити обсяги транзитних перевезень за участю вітчизняних транспортних компаній, що сприяє зростанню їхньої конкурентоспроможності на міжнародному ринку логістичних послуг. Завдяки такому підходу відбувається активне розширення наявних транспортних коридорів та інтеграція української транспортної інфраструктури у світову систему перевезень, що позитивно впливає на ефективність і розвиток національної економіки. Аналіз даних, наведених у таблиці, свідчить про використання різних видів транспорту для перевезення вантажів, серед яких залізничний транспорт займає провідну позицію.

Таблиця

Вантажообіг за видами транспорту, Tonne-kilometres performed, by type of transport	млрд ткм /bln tkm,					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Залізничний	186,3	181,8	175,6	180,4	94,5	90,6
Автомобільний	72,1	65	65,1	61,8	47,4	55,5
Водний	3,4	3,4	2,9	3	1	1,1
Авіаційний	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-

Джерело: Державна служба статистики України

Оптимізація мультимодальних перевезень є критично важливим завданням для логістичних компаній, оскільки можна мінімізувати витрати, скоротити час доставлення та підвищити ефективність використання транспортних ресурсів. Для цього використовують математичні моделі, які допомагають знаходити найкращі маршрути, вибирати максимально оптимальні комбінації видів транспорту і знижувати витрати на перевантаження.

Оптимізаційна модель мультимодальних перевезень базована на методах лінійного програмування та комбінаторної оптимізації. Основними змінними є:

x_{ij}^k – керуюча змінна: кількість вантажу, т, що транспортована між пунктами i та j видом транспорту k ;

C_{ij}^k – вартість перевезення одиниці вантажу між пунктами i та j вибраним видом транспорту k ;

t_{ij}^k – час транспортування між пунктами i та j видом транспорту k ;

p_k – коефіцієнт вартості одиниці часу доставлення для виду транспорту k ;

K_j – пропускна спроможність транспортного вузла j , т;

D_i – попит на вантаж у пункті j ;

V_{ij}^k – максимальна вантажопідйомність транспорту k на ділянці $i \rightarrow j$.

Метою оптимізації є мінімізація загальних витрат на перевезення, що включають прямі транспортні витрати (паливо, експлуатаційні витрати, тарифні ставки); часові витрати (простій транспорту, затримки на перевантаження); митні та адміністративні витрати.

Цільова функція має вигляд

$$\min Z = \sum_j \sum_j \sum_j (C_{ij}^k + p_k * (t_{ij}^k)) * x_{ij}^k$$

де $C_{ij}^k * x_{ij}^k$ – вартість транспортування;

$p_k * t_{ij}^k * x_{ij}^k$ – витрати, пов'язані з тривалістю доставлення.

Ця функція дає змогу ефективно мінімізувати витрати, враховуючи як фінансові, так і часові показники. Однак за оптимізації мультимодальних маршрутів необхідно врахувати низку обмежень:

- баланс вантажопотоків

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^k - \sum_k \sum_j x_{ij}^k = S_i - D_i, \forall i.$$

Ця умова означає, що обсяг вантажу, який прибуває в транспортний вузол, має дорівнювати обсягу вантажу, що його залишає (крім пунктів відправлення та призначення);

- пропускну спроможність вузлів перевалки

$$\sum_i \sum_i x_{ij}^k \leq K_j, \forall j. \quad (3)$$

Транспортні вузли (потри, термінали) мають обмежену здатність до обробки вантажів, що необхідно врахувати при виборі оптимального маршруту;

- вантажопідйомність на маршрутах

$$x_{ij}^k \leq V_{ij}^k, \forall i, j, k. \quad (4)$$

У пункті призначення має бути забезпечений необхідний обсяг поставок відповідно до попиту;

- невід'ємність змінних

$$x_{ij}^k \geq 0, \forall j, j, k. \quad (5)$$

Оскільки перевезення не можуть бути від'ємними, усі значення мають бути додатними.

Запропонована цільова функція спрямована на мінімізацію загальних витрат на мультимодальні перевезення з урахуванням фінансових витрат на транспортування і часових затрат, що виникають у процесі перевезення вантажів; дає змогу врахувати

вартість перевезення, час транспортування та пропускну спроможність транспортних вузлів, що робить її ефективним інструментом для оптимізації логістичних процесів.

Використання розробленої математичної моделі дає змогу суттєво оптимізувати мультимодальні перевезення шляхом ефективного розподілу вантажних потоків між різними видами транспорту, забезпечуючи мінімізацію сукупних витрат. Оптимізація маршрутів сприяє вибору найкращих комбінацій транспорту залежно від витрат, часу доставлення та екологічних показників. Наприклад, використовуючи залізничний транспорт як основний засіб перевезення, можна значно зменшити викиди CO₂, що є важливим аспектом екологічної стійкості. Водночас комбінування залізничного та автомобільного транспорту дає змогу знайти оптимальний баланс між швидкістю перевезення та його вартістю.

Ще одним важливим удосконаленням є врахування пропускну спроможності транспортних вузлів, що дає змогу уникати перевантажень у портах, терміналах і на митниці. Це сприяє мінімізації простой, які часто є причиною затримок у постачанні та збільшення операційних витрат. Відповідно можна більш ефективно управляти транспортними потоками, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження та уникнення критичних затримок.

До того ж ураховуючи в цільовій функції часові витрати, можна ухвалювати рішення, які не лише мінімізують витрати на перевезення, а й скорочують час доставлення, що є особливо важливим для товарів із високими вимогами до швидкості транспортування. Це робить систему більш гнучкою та здатною до швидкої адаптації під зміни ринкового попиту або непередбачувані ситуації на маршрутах.

Запропонована математична модель може бути інтегрована в автоматизовані логістичні системи, що суттєво спрощує процеси управління мультимодальними перевезеннями. Використання цифрових платформ для оптимізації маршрутів дає змогу швидко корегувати логістичні операції в реальному часі та мінімізувати людський фактор, що також підвищує ефективність.

Отже, впровадження цільової моделі дає змогу значно покращити роботу мультимодальних перевезень, забезпечуючи оптимальний вибір транспортних маршрутів, скорочення часу доставлення, зменшення фінансових витрат і покращення екологічних показників. Це сприяє не лише ефективнішому використанню ресурсів, а й загальному розвитку логістичної галузі, підвищуючи її конкурентоспроможність у міжнародній торгівлі.

Висновки.

Мультимодальні перевезення стають невід'ємною та основною частиною сучасної логістики і транспортної індустрії. Завдяки їм можна

оптимізувати процеси перевезень, знижувати витрати і підвищувати ефективність вантажних потоків. Однак важливим аспектом є вибір найоптимальнішої моделі мультимодальних перевезень із мінімальними затратами – запропоновану нами цільову функцію.

За останні роки мультимодальні перевезення мають значні переваги та інновації, які сприяють подальшому розвитку цієї галузі. Використання новітніх технологій, розвиток електронних логістичних платформ та інтеграція різних видів транспорту дають змогу забезпечити більш ефективну та гнучку систему перевезень.

Список використаних джерел

1. Терминология комбинированных перевозок. UNECE. 1 February 2000. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/wp24/documents/wp24-00-1r.pdf>.
2. Мультимодальні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України / Р. В. Вернигора та ін. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. Вип. 14. С. 20–29.
3. Іртищева І. О. Структура транспортно-логістичної системи України. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2015. № 4. С. 146–149.
4. Пасічник А. М. Аналіз та оцінка ефективності використання транзитного потенціалу української транспортної системи. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 12. С. 88–97.
5. Synergy Degree Evaluation of Container Multimodal Transport System / X. Fang, Z. Ji, Z. Chen, W. Chen, C. Cao, J. Gan. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, iss. 4. 1487. <https://doi.org/10.3390/su12041487>.
6. Using mixed methods to design service quality evaluation indicator system of railway container multimodal transport / X. Fang, C. Cao, Z. Chen, W. Chen, L. Ni, Z. Ji, J. Gan. *Science Progress*. 2020. Vol. 103 (1). <https://doi.org/10.1177/0036850419890491>.

IMPROVING THE FUNCTIONING OF CARGO DELIVERY CHAINS BASED ON MULTIMODAL TRANSPORTATION MODELS

Cand. Sc. (Tech.) J. V. Shuldiner, postgraduate student S. V. Petryk

Abstract. In the modern context of globalization and the development of international trade, multimodal transportation plays a key role in ensuring the efficiency of logistics processes. It allows for route optimization, cost minimization, and reduction of delivery time; however, it faces several infrastructural, environmental, and organizational challenges. The study aims to develop optimal approaches to planning multimodal freight transportation using mathematical models of transport optimization. Modern models of multimodal

transportation have been analyzed, identifying their main advantages and disadvantages. A mathematical model for optimizing logistics processes has been proposed, taking into account transportation costs, transit time, and the capacity of transport hubs. The prospects for implementing digital technologies to enhance coordination efficiency between carriers have been considered. The use of the proposed model allows for a significant reduction in transportation costs, minimization of delays, and improvement of the environmental performance of multimodal routes. The integration of digital platforms and the development of multimodal terminals will contribute to improving the efficiency of logistics system management.

Additionally, the research emphasizes the strategic value of adopting intelligent transport systems and artificial intelligence algorithms in supporting real-time decision-making and dynamic route adjustments. The paper also outlines practical recommendations for applying the proposed optimization framework in international supply chains, particularly within the EU and neighboring countries. These recommendations can serve as a foundation for building resilient, sustainable, and technologically advanced logistics networks.

Keywords: multimodal transportation, logistics, transport optimization, digital technologies, environmental sustainability.

Шульдінер Юлія Володимирівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6418-998X.

Петрик С. В., аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна ORCID ID: 0009-0001-5573-9828.

Shuldiner J. V., ¹Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6418-998X.

Petryk S. V., ²Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0009-0001-5573-9828.

ЄЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

ДЕЙНЕГА Т. С., аспірант (УкрДУЗТ),

ЄЛІЗАРЕНКО І. О., провідний інженер Північно-східної філії УДЦР

Організація поїзного радіозв'язку на ділянках зі швидкісним рухом пасажирських поїздів

Запровадження швидкісного руху пасажирських поїздів є основним напрямом розвитку залізничних пасажирських перевезень. В Україні ще в 2005 році була схвалена Державна Програма впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів. Зараз забезпечена організація руху зі швидкостями до 160 км/год, що дозволено в умовах суміщеного руху вантажних і пасажирських поїздів на реконструйованих ділянках залізниць. Це дало змогу організувати швидкісний рух денних експресів між великими містами зі скороченням часу поїздки до комфортних значень.

На ділянках швидкісного руху висувують вимоги до підвищення надійності та організації безперервного зв'язку в межах диспетчерських ділянок. Мережа поїзного радіозв'язку має працювати в дуплексному режимі з використанням цифрових радіотехнологій. Для реалізації додаткових вимог у роботі розроблені технічні пропозиції з організації на діючих ділянках залізниць лінійної дуплексної цифрової радіомережі на основі стандарту DMR.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, швидкісний рух, надійність радіоканалу, запровадження стандарту DMR.

Вступ

Упровадження швидкісного руху пасажирських поїздів є світовим трендом для залізничного транспорту. Зараз по всьому світу організовано понад 45 тис. км залізниць зі швидкісним рухом. Міжнародний союз залізниць відносить до швидкісного руху траси, на яких забезпечується швидкість руху 160-200 км/год для модернізованих ліній і більше 200 км/год – для спеціально побудованих.

В Україні на державному рівні була затверджена Концепція Державної цільової програми впровадження на залізницях швидкісного руху пасажирських поїздів. Метою програми є впровадження швидкісного руху на основних залізничних напрямках [1].

Сучасна інфраструктура залізниць – колії, контактна мережа, електропостачання, телекомунікаційні системи та мережі рухомого радіозв'язку – в умовах швидкісного руху потребує певної модернізації, при цьому поїзний радіозв'язок (ПРЗ) має бути дуплексним [1, 2].

Виходячи з численних публікацій останніх років [3, 4], проблематика організації швидкісного руху на залізницях України залишається актуальною. Вийшла навіть публікація з теоретичних основ впровадження швидкісного руху на залізницях України, яка певною мірою узагальнює світовий досвід [5]. Основну увагу в роботах приділено модернізації колійного господарства та питанням техніко-економічного обґрунтування модернізації залізниць для умов швидкісного руху [4, 5]. Проте недостатньо робіт із модернізації інших об'єктів інфраструктури: електропостачання, засобів автоматики і телекомунікаційних мереж. Зокрема, значної модернізації потребують засоби поїзного радіозв'язку. У сучасних системах поїзного радіозв'язку використано аналогові радіозасоби, і працюють вони в симплексному режимі. Системи рухомого радіозв'язку на ділянках зі швидкісним рухом мають бути дуплексними і цифровими [2]. Але роботи з таких питань практично відсутні.

Постановка проблеми

©ЄЛІЗАРЕНКО А. О., ДЕЯНЕГА Т. С., ЄЛІЗАРЕНКО І. О., 2025

Розроблення технічних пропозицій з організації комплексу цифрових дуплексних мереж поїзного радіозв'язку на ділянках залізниць зі швидкісним рухом пасажирських поїздів.

Основні результати

Поїзний радіозв'язок відіграє важливу роль в удосконаленні управління рухом поїздів і підвищенні безпеки. За вимогами Правил технічної експлуатації залізниць, усі ділянки залізниць мають бути обладнані лінійними і зонними симплексними мережами поїзного радіозв'язку. Лінійні мережі нині організують на основі радіозасобів гектометрового діапазону радіохвиль, які мають обмежені можливості організації зв'язку. У лінійній мережі гектометрового діапазону організують радіозв'язок поїзного диспетчера з машиністами локомотивів і черговими по станціях, які входять у диспетчерське коло.

Зонні мережі ПРЗ вирішують питання радіозв'язку з абонентами, які розосереджені вздовж перегонів (машиністи між собою, ремонтні бригади, чергові по станціях) і працюють у метровому діапазоні радіохвиль.

Зонні мережі ПРЗ можуть забезпечити лише часткове резервування каналів для зв'язку черговий по станції – машиніст. У той же час лінійна мережа диспетчерського зв'язку з машиністами локомотивів у гектометровому діапазоні залишається нерезервованою.

Ділянки зі швидкісним рухом поїздів мають бути обладнані поїзним дуплексним радіозв'язком, причому дуплексні мережі слід реалізовувати на основі цифрових стандартів радіозв'язку [2].

Для реалізації вимог швидкісного руху у статті запропоновано резервування лінійної диспетчерської мережі шляхом створення додаткового дуплексного радіоканалу.

Аналіз показав, що з використанням одиночного радіоканалу неможливо забезпечити високу надійність функціонування мережі ПРЗ за вимогами відповідальних систем [6].

З дублюванням лінійної мережі ПРЗ, зважаючи на розрахункову надійність радіоканалу по полю 0,9-0,95, можна забезпечити інтегральну надійність до 0,999.

Комплексний показник безвідмовної роботи мережі включає надійність технічних засобів P_{mz} і показник надійності радіоканалу по полю P_{pc} і залежить від кратності резервування k . В умовах рухомого залізничного технологічного радіозв'язку необхідно забезпечити розрахункову надійність

безвідмовної роботи одиночного радіоканалу не гірше 0,9-0,95 [7, 8].

Імовірність безвідмовної роботи каналу радіозв'язку P_k можна розрахувати за формулою

$$P_k = 1 - (1 - P_{mz} \cdot P_{pc})^k,$$

де P_{mz} – імовірність безвідмовної роботи технічних засобів, за високої надійності сучасних радіозасобів можна прийняти 0,998;

P_{pc} – розрахункова ймовірність надійності радіоканалу по полю, може складати 0,9-0,95;

k – кратність резервування технічних засобів.

Результати розрахунку для різної надійності радіозв'язку по полю наведені в таблиці.

Надійність резервованих систем

P_{mz}	P_{pc}	P_k у разі кратності резервування $k = 1$	P_k у разі кратності резервування $k = 2$	P_k у разі кратності резервування $k = 3$
0,998	0,950	0,9481	0,9978	0,9998

Реалізація пропозицій із впровадження резервованої цифрової лінійної мережі ПРЗ на такій ділянці дасть змогу виконати вимоги до організації швидкісного руху пасажирських поїздів.

Стандарт DMR забезпечує більшу наступність і сумісність з сучасними аналоговими системами та полегшує проведення модернізації радіомереж [9, 10].

Використовуючи радіообладнання стандарту DMR на мережах залізничного радіозв'язку, можна досягти:

- підвищення якості і надійності каналу радіозв'язку;

- можливості переведення лінійної мережі поїзного радіозв'язку з діапазону 2 МГц у діапазон 160 МГц (зменшення рівня радіозавад, експлуатаційних витрат);

- забезпечення функціонування технологічного радіозв'язку в умовах високого рівня завад на сучасних видах залізничного рухомого складу з асинхронним приводом;

- блокування несанкціонованого виходу в ефір із можливістю встановлення місцезнаходження недозволених радіобладнання;

- впровадження індивідуального та аварійного виклику абонентів;

- організації додаткового каналу передавання даних;

- запровадження системи керування, адміністрування та моніторингу.

На рис. 1 зображено пропонований комплекс мереж, які мають бути організовані на ділянках швидкісного руху.

В умовах суміщеного руху необхідно, щоб були чинними мережі поїзного радіозв'язку в гектометровому та метровому діапазонах. У гектометровому діапазоні стаціонарні радіостанції розташовані вздовж перегону та підключені до розпорядчої станції диспетчера проводимим каналом, а енергія радіохвиль передається за рахунок напрямних ліній уздовж перегонів.

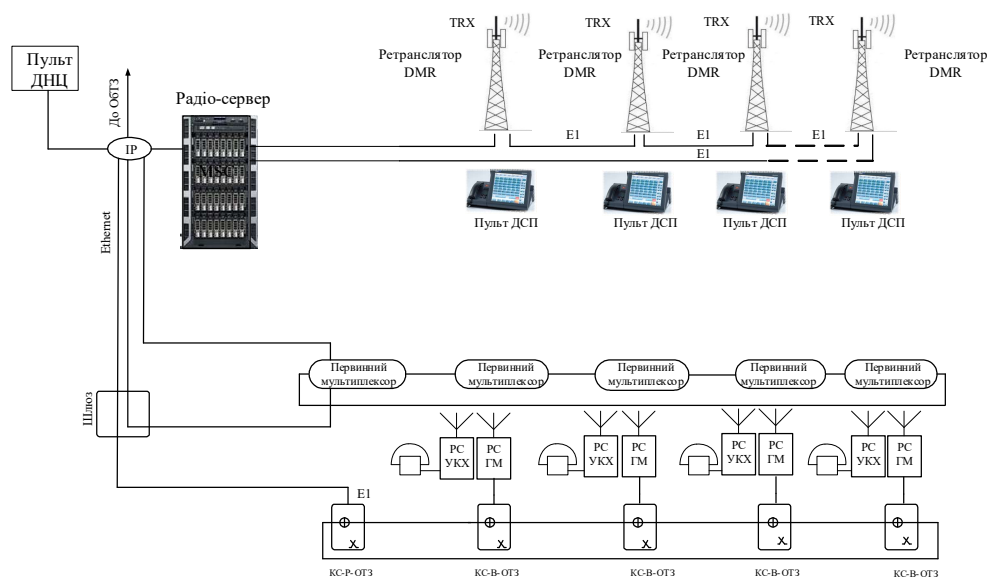


Рис. 1. Комплекс мереж технологічного радіозв'язку

Завдяки часовому розподілу каналів у стандарті DMR можуть бути створені два канали передавання інформації на одній несівній частоті, один для передавання мови, другий для передавання даних. Через другий канал можливе передавання наказів диспетчера та приймання повідомлень від машиніста локомотива, інформації про стан рухомого складу та ін.

Суттєвим недоліком симплексної лінійної мережі ПРЗ є відсутність безперервності зв'язку з переміщенням рухомих абонентів із зони дії різних стаціонарних радіостанцій. З переходом у зону дії іншої радіостанції необхідно здійснити процедуру виклику і встановлення з'єднання. Це потребує значного часу, що недопустимо в умовах швидкісного руху.

На сьогодні у світі всі стандарти рухомого зв'язку використовують функцію Handover (з рук до рук), але з різними технічними особливостями реалізації. Таку функцію мережі рухомого радіозв'язку називають естафетним передаванням абонентського термінала, що обслуговують, або передаванням обслуговування абонентського термінала із зони в зону.

У дуплексній мережі необхідно забезпечувати функції безперервності зв'язку під час руху абонента.

У дуплексній мережі ПРЗ реалізація хендвера спрощена завдяки лінійному розташуванню обмеженої кількості стаціонарних радіостанцій. У лінійній мережі можна використовувати три робочі частоти з чергуванням каналів, як f_1 , f_2 , f_3 . Вибір робочої частоти з переміщенням локомотива, на нашу думку, можливий за ініціації мобільної радіостанції зі зниженням рівня корисного сигналу нижче допустимого.

Для організації дуплексного режиму необхідно забезпечити значне частотне рознесення між смугами передавання та приймання. У стандарті DMR дуплексне рознесення для смуги 160 МГц не встановлене. Але в літературі вважають достатнім інтервал 4 – 5 МГц для роботи репітерів, які виконують функції стаціонарних радіостанцій цифрових мереж ПРЗ.

Чинний частотний план Технологічного радіозв'язку передбачає організацію дуплексного режиму ПРЗ за певного вибору несівних частот.

За цим планом, можна забезпечити дуплексне рознесення каналів у смугах частот 151,725 – 154,000 МГц і 155,000 – 156,000 МГц. Такий підхід дає змогу забезпечити впровадження цифрових радіозасобів у перехідний період, використовуючи наявні аналогові мережі.

Ураховуючи виділені смуги в метровому діапазоні радіохвиль, можна забезпечити умови електромагнітної сумісності репітерів. При цьому верхні частоти вибирають зі смуги 155,500 – 156,000 МГц. Вибираючи такі верхні робочі частоти, не утворюються інтермодуляційні завади вигляду $2f_1 - f_2 = f_{роб}$, які розташовані на більш низьких частотах. Нижні частоти вибирають зі смуги 151,725 – 152,250 МГц, оскільки, починаючи з частоти 152,275 МГц, канали використовують абоненти технологічних мереж станційного радіозв'язку.

У режимі двочастотного симплексу для стаціонарних радіостанцій вибирають частоти передавача з верхньої смуги частот, як прийнято в стільникових мережах рухомого радіозв'язку. Вozимі і носивні радіостанції передають сигнали на частотах, вибраних із нижньої смуги частот.

Необхідно врахувати одночасну роботу зонних мереж ПРЗ метрового діапазону і дуплексних лінійних мереж із використанням спільних антен.

Для підключення декількох передавачів до антени метрового діапазону необхідно використовувати комбайнери. У зв'язку з цим слід ураховувати згасання, які вносять додаткові елементи антенно-фідерних систем.

У локомотивних радіостанціях складніше забезпечити умови ЕМС, тому вони можуть працювати в режимі двочастотного симплексу. Фактично можна використовувати напівдуплексний режим роботи диспетчерської мережі поїзного радіозв'язку: стаціонарні радіостанції працюють у дуплексному режимі, а возимі – режимі двочастотного симплексу.

Необхідна величина рознесення залежить від типу використовуваних фільтруючих пристроїв (дуплексних фільтрів). На одній стаціонарній (базовій) станції номінали частот, що використовують, визначені виходячи з умови забезпечення ЕМС.

Отже, на ділянці зі швидкісним рухом пасажирських поїздів мають бути організовані три мережі поїзного радіозв'язку: основна дуплексна цифрова лінійна мережа на основі радіозасобів стандарту DMR в метровому діапазоні радіохвиль; резервна симплексна лінійна мережа гектометрового діапазону; зонна мережа поїзного радіозв'язку метрового діапазону радіохвиль.

За таких умов локомотивні радіостанції мають бути тримодовими. Пропонована структурна схема локомотивної радіостанції наведена на рис. 2.

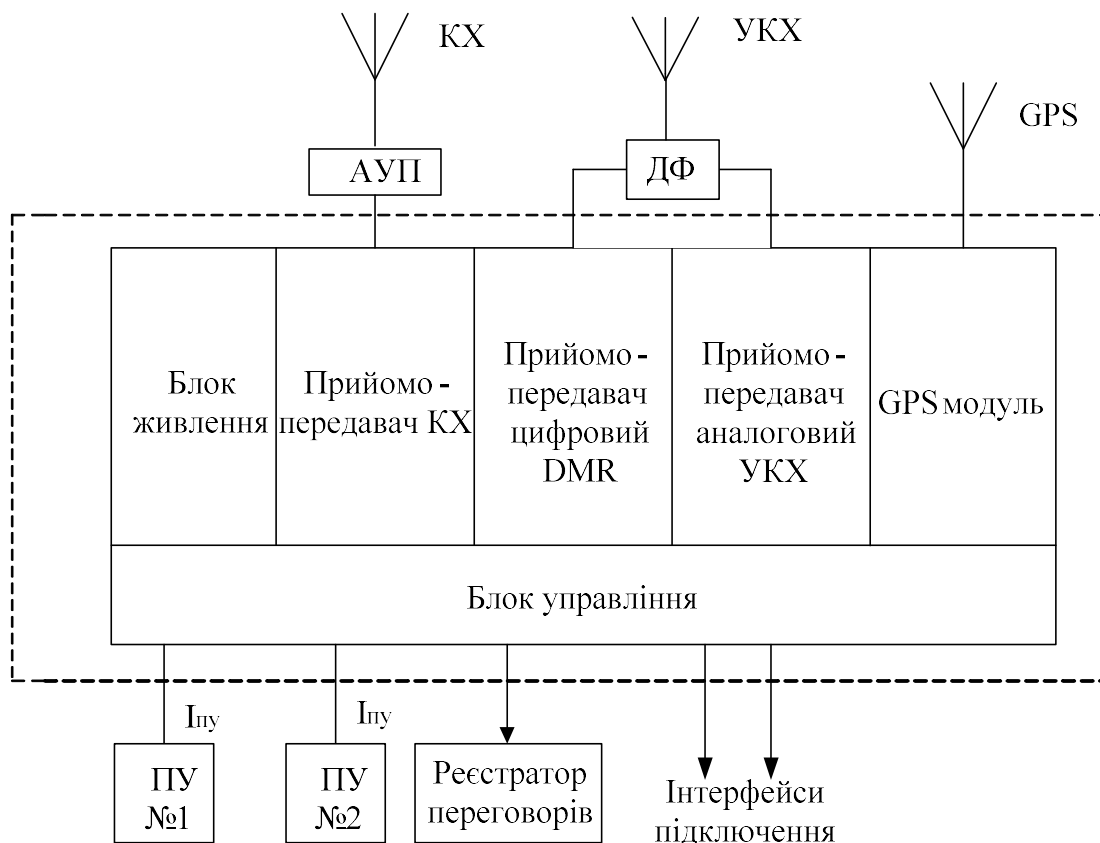


Рис. 2. Структурна схема локомотивної радіостанції ПРЗ

Структурна схема містить три прийомопередавачі з відповідними антенно-фідерними пристроями. При цьому передавач гектометрового діапазону працює як резервний у лінійній мережі ПРЗ. Основний дуплексний лінійний канал організовано на базі радіозасобів стандарту DMR.

Впровадження цифрової дуплексної мережі поїзного диспетчера дає змогу:

1. Підвищити надійність поїзного радіозв'язку за рахунок дублюючої лінійної системи ПРЗ.
2. Створити додатковий канал передавання даних у системі поїзного радіозв'язку за рахунок наявності другого часового інтервалу в системі DMR.
3. Підвищити оперативність передавання інформації за рахунок забезпечення безперервності зв'язку в лінійному каналі.
4. Підвищити якість зв'язку в цифровому каналі з кодуванням мови.
5. Підвищити адресність передавання інформації за рахунок індивідуального і аварійного викликів.

Отже, реалізація пропозицій із впровадження резервованої цифрової лінійної мережі ПРЗ на такій ділянці дає змогу виконати вимоги щодо організації швидкісного руху пасажирських поїздів.

Висновки

1. Цифровий стандарт DMR спеціально адаптований для поступової модернізації сучасних аналогових мереж.
2. Може бути забезпечена можливість поетапного впровадження, що вирішує першочергові завдання і дасть змогу набути досвіду експлуатації цифрових радіозасобів.
3. Можна покращити якість зв'язку в цифровому радіоканалі за великих рівнів індустріальних радіозавод на локомотиві.
4. Використовуючи одиночні радіоканали поїзного радіозв'язку, не можна забезпечити високу надійність на рівні вимог до відповідальних систем, тому запропоновано дублювання лінійних мереж на основі впровадження цифрових радіозасобів.
5. Для забезпечення дуплексного режиму роботи запропоновано вибір пар частот із необхідним дуплексним рознесенням.

6. Упровадження систем стандарту DMR дасть змогу розширити функціональні можливості ПРЗ за рахунок використання другого часового інтервалу для передавання інформації з адміністрування, моніторингу, діагностування мереж.

Yelizarenko Andriy, Deineha Taras, Yelizarenko Ihor. Organization of train radio communication on sections with high-speed passenger train traffic

Список використаних джерел

1. Концепція впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України в 2004-2015 роках. Державна адміністрація залізничного транспорту України. Київ, 2004. 43 с.
2. Правила експлуатації поїзного радіозв'язку: затв. Наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 24.09.2007 р. № 452-Ц. Київ, 2007. 45 с.
3. Оцінювання перспектив впровадження швидкісного руху на залізничних магістралях України / А. О. Ковальов, О. О. Шапатіна, К. В. Кім та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 205. С. 122-131.
4. Лук'янова О. М. Сучасний стан та перспективи розвитку мережі швидкісних залізничних магістралей в Україні в умовах Євроінтеграції. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2018. № 20. С. 107-110.
5. Дейнека О. Г., Юрченко Є. Теоретико-концептуальні засади формування інфраструктурної системи швидкісних залізничних магістралей. *Вісник економіки транспорту та промисловості*. 2017. № 59. С. 52-61.
6. 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.
7. Єлізаренко А. О. Забезпечення необхідної надійності функціонування каналів залізничного технологічного радіозв'язку. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. № 1. С. 41-47.
8. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058. Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
9. Гончаренко В. І., Карлин В., Медведев Я. Єдина платформа для організації цифрового технологічного радіозв'язку стандарту DMR. *Українська залізниця*. 2018. № 1-2. С. 20-26.
10. 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.

Abstract. The introduction of high-speed passenger trains is the main direction of development of railway passenger transportation. In Ukraine, the State Program for the Introduction of High-Speed Passenger Trains was approved back in 2005. The first stage of implementation is now being implemented, the organization of traffic at speeds up to 160 km/h, which is allowed in the conditions of combined traffic of freight and passenger trains on reconstructed railway sections. This made it possible to organize high-speed daytime express traffic between large cities while reducing travel time to comfortable values.

On high-speed sections, requirements are imposed for increasing reliability and organizing continuous communication within dispatching sections. The train radio communication network must operate in duplex mode using digital radio technologies. To implement additional requirements, technical proposals have been developed in the work on the organization of a linear duplex digital radio network on operating railway sections based on the DMR standard.

The DMR digital standard is specially adapted for the gradual modernization of existing analog networks. It is possible to gradually introduce systems that solve the priority tasks and will allow to gain experience in the operation of digital radio equipment. Improving the quality of communication in a digital radio channel, with high levels of industrial radio interference on the locomotive

When using single radio channels of train radio communication, it is impossible to ensure high reliability at the level of requirements for high-responsibility systems, therefore, duplication of linear networks based on the introduction of digital radio equipment is proposed. To ensure duplex operation, it is proposed to select frequency pairs with the necessary duplex diversity. The introduction of such systems will allow to expand the functionality of the PRZ by using the second time interval for transmitting information on administration, monitoring, and diagnostics of networks.

Keywords: railway technological radio communication, high-speed traffic, radio channel reliability, introduction of the DMR standard.

Єлізаренко А. О., к. т. н., доцент кафедри транспортного 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>.

Дейнега Т. С., аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

Deineha Taras, postgraduate student of «Transport connection» Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Єлизаренко І. О., провідний інженер Північно-східної філії Українського державного центру радіочастот. E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Yelizarenko Ihor, Northeast Branch Ukrainian State Centre of Radio Frequencies, Leading engineer. E-mail: elizarenko@ucrf.gov.ua.

ПУЗИР В. Г., д.т.н., професор,
ОБОЗНИЙ О. М., к.т.н., доцент,

ЗАЛАТА А. С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

Інтелектуальна система керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей та еволюційної оптимізації

Анотація. У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та адаптивності керування дизель-генераторними установками (ДГУ) автономного рухомого складу. Запропоновано інтелектуальну систему керування на основі нейронно-нечітких моделей із підтримкою онлайн-адаптації та еволюційної оптимізації. Розроблена система має модульну структуру, включаючи прогностичний блок, локальні регулятори та централізований координатор. Вона демонструє високу стійкість до змін умов експлуатації, здатна до самонавчання та мінімізації витрат. Запропоновано перспективи розвитку на основі глибших нейромережесих архітектур.

Ключові слова: дизель-генераторна установка, інтелектуальне керування, нейронно-нечіткі системи, еволюційна оптимізація, онлайн-адаптація, автономний рухомий склад.

Постановка проблеми.

За умови підвищених вимог до ефективності та екологічності енергетичних систем особливого значення набуває проблема вдосконалення систем керування дизель-генераторними установками (ДГУ), що забезпечують енергопостачання автономного рухомого складу на залізничному транспорті. ДГУ виконують критичні функції з генерації електроенергії в умовах обмеженої або відсутньої інфраструктури електропостачання, при цьому вони мають гарантувати високу надійність, мінімальні витрати пального та відповідність екологічним нормам.

Особливістю експлуатації ДГУ автономного рухомого складу є необхідність забезпечення стабільної роботи системи в умовах різко змінних зовнішніх факторів, широкого діапазону навантажень і старіння агрегатів. Структурна складність системи, наявність нелінійних динамічних зв'язків і невизначеності у фізичних процесах значно ускладнюють завдання побудови ефективної системи автоматичного керування. Традиційні підходи, зокрема регулятори з фіксованими коефіцієнтами, є недостатніми для забезпечення оптимальної роботи ДГУ в усьому спектрі режимів експлуатації.

Зважаючи на підвищені вимоги до екологічної безпеки транспорту, актуальним стає завдання розроблення інтелектуальної системи керування, здатної адаптивно реагувати на зміну умов роботи, забезпечувати енергетичну ефективність і знижувати викиди шкідливих речовин.

Аналіз останніх досліджень.

Упродовж останнього десятиліття спостерігають інтенсивний розвиток інтелектуальних методів керування складними технічними об'єктами. Використання нейронних мереж, нечіткої логіки, гібридних нейронно-нечітких систем (ANFIS), а також еволюційних алгоритмів оптимізації демонструє високі результати у задачах нелінійного керування та адаптації систем до змінних умов [1-3].

У галузі енергетичних установок значну увагу приділяють застосуванню нейронних мереж для апроксимації складних залежностей між технологічними параметрами. Дослідження [4] показують ефективність використання глибоких нейронних мереж для оптимізації режимів роботи теплових машин. У той же час поєднання нейронних мереж із нечіткою логікою дає змогу підвищити інтерпретованість і стійкість керуючих алгоритмів [5, 6].

У контексті дизель-генераторних установок застосування інтелектуальних систем керування розглядають у роботах [7, 8]. Проте більшість сучасних рішень зосереджено на статичних або слабо адаптивних системах, що обмежує їхню ефективність в умовах динамічної експлуатації рухомого складу.

Недостатньо дослідженою залишається проблема онлайн-адаптації параметрів нейронно-нечітких моделей у реальному часі з урахуванням змін у технічному стані агрегатів і зовнішніх умов [9, 10]. Крім того, малодослідженим є питання інтеграції модулів прогнозування технічного стану до загальної архітектури системи керування ДГУ.

Виділення невирішених питань.

©ПУЗИР В. Г., ОБОЗНИЙ О. М., ЗАЛАТА А. С., 2025

Попри значний прогрес у розвитку інтелектуальних систем керування, залишається низка важливих наукових завдань, вирішення яких є критичним для підвищення ефективності та надійності ДГУ автономного рухомого складу.

По-перше, сучасні підходи для побудови нейронно-нечітких систем переважно передбачають стаціонарне навчання, що не дає змогу враховувати зміну характеристик агрегатів у процесі експлуатації. Через старіння компонентів і непередбачувані зміни навантаження необхідним є розроблення механізмів онлайн-адаптації моделей.

По-друге, актуальним є завдання розроблення архітектури інтелектуальної системи з модульною структурою, яка дасть змогу забезпечити узгоджену взаємодію локальних регуляторів і централізованого координуючого блока. Потрібно забезпечити мінімальні часові затримки і стійкість системи навіть за раптових змін умов експлуатації.

По-третє, недостатньо опрацьованими залишаються питання активного моніторингу технічного стану агрегатів ДГУ з використанням рекурентних нейронних мереж і їхньої інтеграції до процесу ухвалення керуючих рішень у реальному часі.

Вирішення зазначених завдань становить актуальну наукову проблему, що визначає необхідність проведення комплексного дослідження, присвяченого створенню нової архітектури інтелектуальної системи керування ДГУ з підвищеними адаптивними властивостями.

Постановка задачі дослідження.

Метою дослідження є розроблення інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей із можливістю онлайн-адаптації та використанням еволюційних алгоритмів оптимізації.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку науково-технічних завдань: сформулювати математичні моделі основних підсистем ДГУ, забезпечити можливість адаптивного прогнозування оптимальних режимів роботи на основі поточних технологічних параметрів, розробити механізми онлайн-навчання нейронно-нечітких регуляторів, забезпечити інтеграцію модулів моніторингу технічного стану агрегатів у загальну архітектуру системи керування, а також реалізувати модуль глобальної оптимізації параметрів системи за багатокритеріальною цільовою функцією.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У процесі аналізу підходів для побудови інтелектуальних систем керування ДГУ було встановлено, що використання класичних регуляторів із фіксованими параметрами не забезпечує необхідного рівня адаптивності в умовах змінних режимів експлуатації. Навіть застосування адаптивних регуляторів із заздалегідь визначеними

законами корекції є недостатньо ефективним у випадку структурної зміни об'єкта або появи нових експлуатаційних факторів.

Методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, демонструють високу здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами системи. За теоремою універсальної апроксимації, багатошарова нейронна мережа здатна апроксимувати довільну неперервну функцію в компактній області. Формально така апроксимація може бути подана як

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx \sum_{i=1}^q g_i \left(\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j \right), \quad (1)$$

де g_i – нелінійні функції активації;

ω_{ij} – вагові коефіцієнти;

x_j – вхідні сигнали.

Проте нейронні мережі мають суттєві обмеження, пов'язані з необхідністю наявності великої кількості навчальних даних і недостатньою інтерпретованістю моделі.

З іншого боку, нечітка логіка дає змогу ефективно працювати з неточними та неповними даними, формулюючи правила керування у вигляді лінгвістичних конструкцій. Формально нечітке правило можна подати як

$$R_i : \text{Якщо } x_1 \in A_1^i \text{ і } x_2 \in A_2^i, \text{ тоді } u \in B^i, \quad (2)$$

де A_1^i, A_2^i, B^i – нечіткі множини.

З урахуванням зазначених особливостей було ухвалено рішення реалізувати комбіновану нейронно-нечітку систему керування. Архітектура такого типу дає змогу об'єднати переваги обох підходів: здатність нейронної мережі до навчання та апроксимації з інтерпретованістю нечітких правил.

Гібридна система, подана як адаптивна нейронно-нечітка система виведення (ANFIS), має п'ятирівневу структуру обробки даних. Математично модель ANFIS може бути подана у вигляді

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \quad (3)$$

де ω_i – вагові коефіцієнти;

z_i – вхідні сигнали.

Процес навчання такої системи передбачає використання методів еволюційної оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів, що забезпечують глобальний пошук оптимальних параметрів нечітких множин і нейронної архітектури.

Розроблена інтелектуальна система керування ДГУ побудована за модульним принципом, що дає змогу забезпечити високу гнучкість, масштабованість і стійкість. Загальна структура системи включає чотири основні модулі: блок прогнозування режимів роботи дизельного двигуна, блок регулювання генератора, блок керування системою наддуву та централізований координуючий блок.

На нижньому рівні системи функціонують сенсори та виконавчі механізми, що збирають дані та реалізують керуючі впливи. Середній рівень подано як нейронно-нечіткі модулі локального регулювання. Верхній рівень — координуючий блок, який виконує оптимізацію та синхронізацію роботи всієї системи.

Формально взаємодію модулів системи описано рівняннями

$$U_D(t) = F_D(X(t), \Theta_D(t)), \quad (4)$$

$$U_G(t) = F_G(X(t), \Theta_G(t)), \quad (5)$$

$$U_T(t) = F_T(X(t), \Theta_T(t)), \quad (6)$$

$$Y(t) = H(U_D(t), U_G(t), U_T(t)), \quad (7)$$

де $X(t)$ – вектор вхідних параметрів;

$\Theta_D(t)$, $\Theta_G(t)$, $\Theta_T(t)$ – параметри адаптації;

H – функція системної відповіді.

Координуючий блок здійснює глобальну оптимізацію параметрів за багатокритеріальною функцією втрат, що враховує економічність, стабільність і екологічність роботи системи.

Кожен із нейронно-нечітких модулів локального регулювання у складі інтелектуальної системи має ієрархічну структуру обробки інформації, що включає вхідний рівень нормалізації даних, рівень фазифікації, рівень активації правил нечіткої бази знань, рівень дефазифікації та рівень формування вихідного керуючого впливу.

На рівні фазифікації кожна вхідна змінна x_i перетворюється у ступінь належності до відповідних нечітких множин за допомогою функцій належності. Використовують, зокрема, гаусові функції

$$\mu_{A_i}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

де c – центр нечіткої множини;

σ – її ширина.

На рівні активації обчислюють ваги кожного правила:

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j), \quad (9)$$

де $\mu_{A_j^i}(x_j)$ – ступінь належності x_j до відповідної нечіткої множини у правилі i .

Вихідна дія системи формується шляхом нормалізованого зваженого середнього всіх активних правил.

Ця архітектура забезпечує високу точність і стійкість регулювання, навіть у випадках наявності шумів або неточних вимірювань.

Для забезпечення стійкості інтелектуальної системи керування в умовах нештатних ситуацій було розроблено механізм перемикання між інтелектуальним і резервним режимами керування. Формально логіка перемикання задана як

$$Mode(t) = \begin{cases} IntelligentControl, & \text{if } \forall i, x_i(t) \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \\ BackupControl, & \text{if } \exists i, x_i(t) \notin [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \end{cases} \quad (10)$$

Для активного моніторингу технічного стану агрегатів системи було впроваджено модуль прогнозування на основі рекурентної нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). Математична модель такого блока описана рівняннями

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j), \quad (11)$$

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i),$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C),$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t,$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad h_t = o_t * \tanh(C_t).$$

Застосовуючи LSTM, можна здійснювати раннє виявлення деградації агрегатів і прогнозувати їхній технічний стан на горизонті кількох циклів експлуатації.

Основним елементом інтелектуальної системи є модуль багатокритеріальної оптимізації параметрів керування в реальному часі. Для реалізації цього модуля було застосовано метод рою частинок (PSO), адаптований для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Оновлення швидкості та позиції кожної частинки в оптимізаційному просторі описано системою рівнянь

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (g - x_i(t)), \quad (12)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (13)$$

де $v_i(t)$ – швидкість i -ї частинки на ітерації t ;
 $x_i(t)$ – позиція частинки на ітерації t ;
 p_i – найкраща індивідуальна позиція;
 g – глобально найкраща позиція рою;
 ω – коефіцієнт інерції;
 c_1, c_2 – коефіцієнти навчання;
 r_1, r_2 – випадкові числа.

Цей модуль здійснює адаптивне налаштування параметрів нейронно-нечітких регуляторів у реальному часі для забезпечення мінімізації багатокритеріальної функції втрат

$$J(x) = \omega_1 \cdot SFC(x) + \omega_2 \cdot NO_x(x) + \omega_3 \cdot PM(x) + \omega_4 \cdot \Delta U(x) + \omega_5 \cdot \Delta U(x) \text{ PSO Fuzzy PID Control. } \quad (14)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – вагові коефіцієнти, визначені з урахуванням експлуатаційних пріоритетів.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження було розроблено нову архітектуру інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу. Система поєднує нейронно-нечіткі модулі локального регулювання, модуль прогнозування технічного стану агрегатів і координуючий блок багатокритеріальної оптимізації.

Використання гібридної нейронно-нечіткої архітектури забезпечило високу адаптивність і стійкість системи в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Реалізація механізмів онлайн-адаптації дала змогу врахувати структурні зміни об'єкта і забезпечити безперервне самонавчання системи у процесі її експлуатації.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення функціонала системи за рахунок інтеграції додаткових каналів інформації про зовнішнє середовище, удосконалення методів інкрементального навчання нейронних мереж, а також підвищення ефективності модулів прогнозування технічного стану шляхом використання більш глибоких рекурентних архітектур.

Список використаних джерел

- Jurado F. & Saenz J.R. (2002). Neuro-fuzzy control for autonomous wind–diesel systems using biomass. *Renewable Energy*. 27(1). 39–56 DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00170-7.
- Conteh F., Tobaru S., Lotfy M. E., Yona A. & Senjyu T. (2017). An effective Load shedding technique for micro-grids using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *AIMS Energy*. 5(5). 814–837. DOI: 10.3934/energy.2017.5.814.
- Sun J., Yan Z., Han Y. & Yang C. (2023). Advancing predictive maintenance for gas turbines: an intelligent monitoring approach with ANFIS, LSTM and reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*.
- Abdolrasol M. G. M. et al. (2021). Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. *Electronics*. 10(21). 2689. DOI: 10.3390/electronics10212689.
- Mohayedi H. et al. (2020). Optimization of ANFIS with GA and PSO estimating α ratio in driven piles. *Engineering Computations*.
- Fu J., Gu S., Wu L., Wang N., Lin L. & Chen Z. (2025). Research on Optimization of Diesel Engine Speed Control Based on UKF-Filtered Data and PSO Fuzzy PID Control. *Processes*. 13(3). 777. DOI: 10.3390/pr13030777.
- Hosoz M., Isik D. & Cevik M. (2013). ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends. *Fuel*. 104. 140–148. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.075.
- Cheng Y., Zhang J., Al Shurafa M., Liu D., Zhao Y., Ding C. & Niu J. (2024). An improved multiple adaptive neuro-fuzzy inference system based on genetic algorithm for energy management system of island microgrid. *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/s41598-025-98665-x.
- Shamshirband S., Hadipoor M., Baghban A., Mosavi A., Bukor J. & Varkonyi-Koczy, A. Developing an ANFIS PSO Model to Estimate Mercury Emission in Combustion Flue Gases. *arXiv preprint* (2019). DOI: 10.48550/arXiv.1910.05118.
- Sekhar D. C., Pokanati V. V. R. R. & Kiranmayi R. (2022). A novel efficient adaptive-neuro fuzzy inference system control based smart grid to enhance power quality. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 12(4). 3375–3387. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp3375-3387.

Пузир Володимир Григорович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049. Тел.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

Обозний Олександр Миколайович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

PuzyrVolodymyr, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049. Tel.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

Oboznyi Oleksandr, PhD (Tech.), senior lecturer, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Tel.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua. ment of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

Intelligent Control System for Diesel Generator Unit of Autonomous Rolling Stock Based on Neuro-Fuzzy Models and Evolutionary Optimization

This article addresses the critical challenge of improving the efficiency and adaptability of control systems for diesel generator units (DGUs) used in autonomous rail transport. The study introduces an intelligent control architecture based on hybrid neuro-fuzzy models capable of real-time adaptation and evolutionary optimization. The system is designed with a modular structure, incorporating four main components: a diesel engine operation forecasting module, a generator regulation block, a turbocharging control unit, and a centralized coordination module.

The developed neuro-fuzzy system employs an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) structure, combining the learning ability of neural networks with the interpretability of fuzzy logic. Evolutionary algorithms, specifically genetic algorithms and particle swarm optimization (PSO), are used for global parameter tuning to minimize a multi-objective loss function that considers fuel efficiency, stability, and environmental compliance.

A key feature of the system is its online self-learning mechanism, allowing dynamic adaptation to component aging, operational uncertainty, and shifting load conditions. Furthermore, a Long Short-Term Memory (LSTM)-based module is integrated for technical state forecasting, enabling early detection of degradation and proactive maintenance planning.

Simulation results demonstrate the robustness and responsiveness of the proposed control system across various operational scenarios. The architecture ensures sustained energy efficiency, reduced emissions, and resilience under sudden environmental or mechanical shifts.

Future work includes enhancing the prediction accuracy of the LSTM module, integrating external environmental data, and expanding the system's capabilities through incremental neural network learning methods. The presented research contributes to the development of smart energy systems in autonomous transport and provides a foundation for scalable, adaptive control technologies.

Keywords: diesel generator unit, intelligent control, neuro-fuzzy systems, evolutionary optimization, online adaptation, autonomous rolling stock.

ЛАРЧЕНКО Л. В., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки,

РОЖНОВА Т. Г. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки,

ЛАРЧЕНКО Б. Д., канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки,

ПАХОМОВ Ю. В. канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харківський Національний університет міського господарства

Моделі проектування online-обчислювача дробово-іраціональних функцій із бітовим потоком даних

Анотація: У роботі запропоновано удосконалену математичну модель біт-потокowego online-обчислювача дробово-іраціональних функцій із мінімізацією похибки обчислень, яку подано як декомпозицію математичних моделей обчислювачів біт-потокowych степеневих і лінійних функцій, що дало змогу розширити функціональні можливості пристрою; узагальнену архітектуру дробово-іраціонального обчислювача; автоматну модель пристрою, яку створено на основі кінцевого автомата; розроблено графові моделі, що забезпечують чіткість і несуперечність алгоритму обчислення дробово-іраціональної функції. Досліджуваний обчислювач є ефективним із точки зору точності обчислення, простоти технічної реалізації та універсальності архітектури.

Ключові слова: функціональне перетворення, бітовий потік даних, біт-потоккові обчислення, математична модель, апроксимація, абсолютна похибка обчислень, автоматна модель, граф переходів, граф-схема алгоритму.

Вступ

Область дослідження. Моделі та методи проектування потокowych online-обчислювачів елементарних математичних функцій із бітовим (імпульсним) потоком даних.

Аналіз наявних рішень

У наш час збільшується кількість систем реального часу, зокрема сенсорні системи, системи управління, контролю та вимірювань, у яких

упроваджено нову тенденцію периферійних обчислень, що передбачає переміщення оброблення даних максимально близько до сенсорних компонентів [1]. Для вирішення такого завдання необхідно створення компонентів і пристроїв, що орієнтовані на потокову обробку інформаційних сигналів, у тому числі і біт-потокowych, які виконують функціональне перетворення частотних і час-імпульсних сигналів, отриманих від сенсорів фізичних величин. Тому дослідження, мета якого полягає в розробленні моделей і методів проектування апаратних online-обчислювачів

© ЛАРЧЕНКО Л. В., РОЖНОВА Т. Г., ЛАРЧЕНКО Б. Д., ПАХОМОВ Ю. В., 2025

елементарних математичних функцій із біт-поточною формою даних, які могли б відтворювати ширший спектр елементарних математичних функцій єдиним способом і використовувати для їх реалізації уніфіковані компоненти для синтезу архітектур, що забезпечує при цьому виконання заданих вимог за точністю і часом обчислення апроксимуючих функцій, є актуальним і практично важливим.

Біт-поточкова форма даних являє собою імпульсні потоки з одиначною амплітудою, інформативним параметром у біт-поточковому кодуванні є фіксоване значення імпульсів за часовий інтервал [2].

Питання аналізу методів і засобів відтворення математичних функцій за допомогою пристроїв функціонального перетворення виникає у зв'язку з широким вибором таких пристроїв і різноманітністю вирішуваних ними завдань, їхньою специфікою і технічними вимогами. При цьому для будь-якого методу може бути вибрано раціональні засоби його реалізації.

У роботі [3] обґрунтовано актуальність розроблення функціональних перетворювачів для виконання присенсорних обчислень у сенсорних системах, розглянуто алгоритми потокової обробки, що виконують лінеаризацію сигналів у формі імпульсного потоку або широтно-модульованого сигналу, запропоновано пристрій обробки результатів вимірювань, у якому функціональне перетворення здійснюється в режимі відстеження.

У роботі [4] запропоновано структуру перетворювача параметрів частотних сигналів у цифровий код на основі радіальної нейронної мережі. Запропоновано декомпозицію перетворювача на дві складові, у якій друга складова є радіальною базовою мережею.

У роботах [5, 6] досліджено архітектури, що побудовані на основі алгоритму CORDIC, розглянуто принципи проєктування та реалізації тригонометричних і логарифмічних функцій на платформах FPGA і ASIC. У роботі [7] розглянуто алгоритм поділу на основі операції оберненої дії та множення, де операція оберненої дії базована на алгоритмі Ньютона-Рафсона, за якого початкове значення забезпечено кусково-поліноміальною апроксимацією.

У роботі [8] розглянуто поточковий степеневий обчислювач, архітектура якого містить конвеєрні структури для підвищення його швидкодії. У роботі [9] розглянуто апаратний поточковий обчислювач дробово-раціональних функцій, математичну модель якого розроблено алгоритмічним шляхом на підставі різницевих нерівностей. У статті [10] запропоновано математичну модель поточкового обчислювача ірраціональних функцій, що включає математичні

моделі обчислювачів дробово-раціональної функції та функції вилучення кореня.

Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення математичних, архітектурних і автоматних моделей проєктування апаратних online-обчислювачів дробово-ірраціональних функцій із біт-поточною формою даних для підвищення точності обчислень і швидкодії пристрою за рахунок застосування методу формування приростів висхідних ступінчастих функцій, швидкодіючих конвеєрних структур і графових моделей, що забезпечують чіткість алгоритму обчислень і керування обчислювальними станами пристрою.

Постановка задачі

Об'єкт дослідження – процеси проєктування спеціалізованих апаратних біт-поточкових online-обчислювачів дробово-ірраціональних функцій. Предмет дослідження – математичні та автоматні моделі апаратних online-обчислювачів елементарних математичних функцій із біт-поточною формою даних.

Завданням дослідження є розроблення удосконаленої математичної моделі біт-поточкового online-обчислювача дробово-ірраціональних функцій із використанням методу формування приростів висхідних ступінчастих функцій на основі обернених функцій із мінімізацією похибки обчислень; створення узагальненої архітектури дробово-ірраціонального обчислювача з використанням швидкодіючих конвеєрних структур на основі математичної моделі пристрою; розроблення автоматної моделі функціонального пристрою на основі кінцевого автомата шляхом створення графових моделей реалізації дробово-ірраціональної функцій, із використанням яких може бути здійснено автоматизований синтез архітектурної моделі з використанням мов опису апаратури.

Основний матеріал

Створюючи поточкові online-обчислювачі, основну увагу спрямовують на підвищення точності та пришвидшення обчислень елементарних математичних функцій. Будуючи нелінійні поточкові online-обчислювачі для відтворення елементарних функцій, використовують наближені та принципово-точні методи. Основним критерієм, що визначає ефективність апроксимації для обчислювальних задач, є похибка апроксимації відтворюваної функції. Одним із принципово точних методів є метод визначення алгебраїчних рівнянь на основі оберненої функції, що є основою математичних моделей пристроїв, розглянутих у цій роботі.

У роботі [11] розглянуто математичний апарат, що лежить в основі побудови біт-поточкових

обчислювачів елементарних функцій. Метод формування приростів на основі обернених функцій забезпечує виконання вимог до функціональних online-обчислювачів, які забезпечують точність і час процесу обчислення, простоту технічної реалізації та універсальність архітектури з точки зору її використання для виконання інших математичних операцій. Як результат, метод дає змогу застосувати єдиний підхід для проектування біт-потоків online-обчислювачів.

Розглядаючи метод формування приростів висхідних ступінчастих функцій, аргумент яких подано у формі бітового (імпульсного) потоку, зазначено, що безперервна, монотонно висхідна функція, яка має зворотну, може бути відтворена на виході біт-потоків online-обчислювача апроксимуючою функцією:

$$y = [f(x) + |\delta_{\max}|], \quad (1)$$

де x , y – вхідний і вихідний бітові потоки даних відповідно; діапазон граничних значень абсолютної похибки відтворення безперервної функції складає $0, 5 \leq |\delta_{\max}| < 1$.

У формулі (1) квадратні дужки позначають результат обчислення апроксимуючої функції в цілих числах.

Вибіркові значення x_y числової послідовності бітів $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$, що відповідають рівням вузлів апроксимації ступінчастої функції, вибирають із вхідного бітового потоку x і визначають за формулою

$$\Psi(y - |\delta_{\max}|) \leq x_y < \Psi(y - |\delta_{\max}|) + 1, \quad (2)$$

де $y = 1, 2, 3, \dots, k$; $\Psi(y - |\delta_{\max}|)$ – функція, обернена $f(x)$.

За абсолютної похибки обчислень $|\delta_{\max}| = 0,5$ вибіркові значення x_y визначають за формулою

$$\Psi(y - 0,5) \leq x_y < \Psi(y - 0,5) + 1. \quad (3)$$

Розглянутий метод забезпечує безперервний процес відтворення функцій у процесі надходження бітового потоку x на вхід обчислювача та є раціональним із точки зору часу відтворення функцій, що не перевищує тривалості бітового потоку x і точності відтворення функцій для цілочисельних значень аргумента з похибкою обчислень, що не перевищує 0,5 одиниці молодшого біта аргумента. Метод формування приростів було використано для розроблення математичної моделі біт-потоків online-обчислювача дробово-іраціональних функцій.

Дробово-іраціональні функції можуть бути відтворені на підставі двох функціональних пристроїв, що є складовою біт-потоків обчислювача дробово-іраціональних функцій:

– біт-потоків дробово-раціонального обчислювача. Пристрій має обмеження частоти вхідного бітового потоку внаслідок генерації на виході дробово-раціонального обчислювача серій бітових потоків;

– біт-потоків степеневих обчислювача. Перевагою пристрою, що включає в архітектуру степеневий обчислювач, є відсутність генерації на його виході серій бітових потоків, оскільки пристрій працює в режимі вибірки бітів із вхідного потоку, що дає змогу розширити частотний діапазон вхідного сигналу дробово-іраціонального обчислювача.

У зв'язку з названою перевагою в роботі розглянуто біт-потоків обчислювач дробово-іраціональних функцій, побудований на основі біт-потоків степеневих обчислювача.

Дробово-іраціональна апроксимуюча функція, що має бути відтворена на виході функціонального пристрою, має такий вигляд:

$$y = \left[\frac{1}{p} \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} + |\delta_{2\max}| \right] + |\delta_{1\max}| \right], \quad (4)$$

де x_i – серії бітових потоків;

n – кількість серій із ненульовою кількістю бітів у серії;

$|\delta_{1\max}|$ – граничне значення абсолютної похибки

поділу $\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ на число p ;

$|\delta_{2\max}|$ – граничне значення абсолютної похибки

вилучення кореня;

$\frac{1}{p}$ – масштабний коефіцієнт.

Якщо абсолютна похибка обчислень мінімальна $|\delta_{\max}| = 0,5$, то функція набуває вигляду

$$y = \left[\frac{1}{p} \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} + 0,5 \right] + 0,5 \right]. \quad (5)$$

Вхідним інформаційним сигналом обчислювача є бітовий потік x (серії бітів), на виході пристрою формується бітовий потік y , що відтворює апроксимуючу дробово-іраціональну функцію.

Аналіз функції (2) показав, що дробово-іраціональну функцію обчислюють у два етапи. При цьому серіями бітових послідовностей вхідного сигналу здійснюють такі обчислювальні операції:

– на першому етапі необхідно здійснити піднесення до степеня і вилучення кореня – функції

$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$, що може бути реалізовано в біт-потоківому

степеневому обчислювачі;

– далі ділять отриманий результат на константу p , що може бути реалізовано в дільнику чисел, побудованому на основі потокового обчислювача лінійних функцій.

Ураховуючи двоетапне обчислення дробово-іраціональної функції у функціональному пристрої перетворення бітових потоків і те, що її реалізація може бути здійснена в синтезованій архітектурі, що містить біт-потоківі обчислювачі степеневі та лінійної функцій, математична модель пристрою, що відтворює апроксимуючу дробово-іраціональну функцію, подана як декомпозиція математичних моделей названих пристроїв.

Степенева та лінійна функції мають обернені їм функції, тому з розробленням математичних моделей названих пристроїв було використано метод формування приростів на основі обернених функцій і формулу (3). Розглянемо отримані математичні моделі пристроїв, що є складовими архітектури досліджуваного обчислювача.

1. На першому етапі дробово-іраціональним обчислювачем реалізована проміжна апроксимуюча степеневі функція

$$y = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} + 0,5 \right]. \quad (6)$$

Функція (6) викликає інтерес, оскільки з реалізацією обчислювачем цієї функції розв'язують практичну задачу – добування квадратного кореня з суми квадратів чисел, поданих як серії бітових послідовностей.

Для отримання математичної моделі досліджуваного пристрою розглянуто апроксимуючу степеневу функцію, аргументом якої є бітовий потік однієї серії бітів,

$$y = \left[\sqrt{x^2} + 0,5 \right]. \quad (7)$$

Визначивши зворотну функцію для формули (7), отримали нерівність

$$2^2 x_y^2 \geq (2y_k - 1)^2. \quad (8)$$

На підставі нерівності (8) розроблено математичну модель біт-потоківому обчислювача степеневі функції, яка подана як система різницьових нерівностей: $2^2 x_1^2 \geq (2y_1 - 1)^2$,

$$2^2 (x_2^2 - x_1^2) + \Delta_1 \geq (2y_2 - 1)^2 - (2y_1 - 1)^2 \quad (9)$$

$$2^2 (x_y^2 - x_{y-1}^2) + \Delta_{y-1} \geq (2y_1 - 1)^2 - (2y_{1-1} - 1)^2,$$

де Δ_{y-1} – різниця, визначена як результат порівняння приростів поточних значень функцій $2^2 x^2$ і $(2y - 1)^2$, які визначають між двома сусідніми вузлами апроксимації функції на попередньому кроці порівняння. При цьому значення $y_1 \leq y \leq y_k$, $1 \leq y_k \leq k$; $x_0, \Delta_0 = 0$.

У формулі (9) Δ_1 і Δ_{y-1} визначають як

$$\Delta_1 = 2^2 x_1^2 - (2y_1 - 1)^2,$$

$$\Delta_{y-1} = 2^2 (x_y^2 - x_{y-1}^2) + \Delta_{y-2} - (2y_k - 1)^2 + (2y_{k-1} - 1)^2$$

При надходженні на вхід пристрою біта з номером x_y на виході пристрою буде сформований вихідний біт y_k при виконанні кожної з нерівностей (9).

2. На другому етапі обчислень необхідно поділити проміжний результат обчислення степеневі функції на константу p з урахуванням похибки $|\delta_{\max}| = 0,5$, що може бути реалізовано в дільнику чисел на основі біт-потоківому обчислювача лінійних функцій, який відтворює апроксимуючу функцію:

$$y = \left[\frac{1}{p} x + 0,5 \right]. \quad (10)$$

Скориставшись формулою (3), на основі оберненої функції отримано нерівність для визначення вибірових значень x_y :

$$\frac{p(2y-1)}{2} \leq x_y < \frac{p(2y-1)}{2} + 1. \quad (11)$$

На підставі виразу (11) отримано нерівність

$$2x_y \geq p(2y_k - 1). \quad (12)$$

Математичну модель біт-потокowego обчислювача лінійних функцій отримано з використанням нерівності (12), яку подано як систему різницьових нерівностей:

$$2x_1 \geq p,$$

$$2(x_2 - x_1) + \Delta_1 \geq 2p,$$

$$2(x_3 - x_2) + \Delta_2 \geq 2p, \quad (13).$$

.....

$$2(x_y - x_{y-1}) + \Delta_{y-1} \geq 2p,$$

де різниця $\Delta_{y-1} = 2(x_y - x_{y-1}) + \Delta_{y-2} - 2p$.

Проектуючи біт-потоківі online-обчислювачі дробово-іраціональних функцій, запропоновано єдиний підхід для створення їхніх архітектурних моделей, урахувуючи принципи організації обчислювального процесу на основі аналізу отриманих математичних моделей пристроїв, що дає змогу синтезувати архітектурні рішення. Виконання обчислювальних процедур єдиним способом дає змогу використовувати в таких моделях вузьку номенклатуру компонентів, щоб будувати архітектури на основі уніфікованих блоків. На рис. 1 наведено узагальнену архітектуру біт-потокowego дробово-іраціонального online-обчислювача.

Обчислення дробово-іраціональної функції здійснюється у два етапи, тому узагальнена архітектурна модель обчислювача містить два модулі:

– перший модуль являє собою узагальнену

архітектуру біт-потокowego online-обчислювача, у якій обчислюють проміжну степеневу функцію $y_{int} := f(x)$. Модуль містить Block1, Block2 і суматор SM_int. На виході SM_int формується бітовий потік, що є результатом обчислення проміжної функції;

– другий модуль являє собою архітектуру дільника чисел, побудовану на основі біт-потокowego обчислювача лінійної функції та реалізує другий етап обчислень – ділення значення проміжної функції на константу. Дільник містить блок Block3 і суматор результату SM_RES. На виході SM_RES формується бітовий потік, що є результатом обчислення дробово-іраціональної функції.

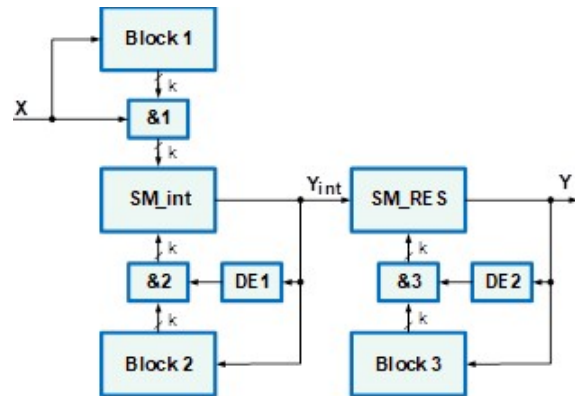


Рис. 1. Узагальнена архітектура дробово-іраціонального online-обчислювача

Block1 і Block2 – конвеєрні архітектури, що містять базову архітектуру біт-потокowego обчислювача поліноміальних функцій, побудованого на суматорах і включеного у прямий і зворотний зв'язок степеневого обчислювача, що є складовою узагальної архітектури. На вхід пристрою подано серії бітових потоків x_i . На виході SM_int формується результат обчислення проміжної степеневі функції – вихідний бітовий потік y_{int} , що поданий на вхід SM_RES, який є компонентом дільника чисел. На виході SM_RES формується вихідний бітовий потік, що є результатом обчислення дробово-іраціональної функції y . Біти переповнення SM_RES відповідають формуванню сходинок апроксимуючої функції дробово-іраціонального обчислювача. Основними обчислювальними компонентами створеної архітектури є суматори SM_int і SM_RES зі зворотним зв'язком, що використовують як компонент порівняння паралельних кодів. У суматор SM_int з Block1 поступають прямі двійкові коди чисел, а з Block2 – додаткові двійкові коди чисел.

Апаратний потоковий обчислювач поданий як мікропрограмний автомат, що є композицією керуючого і операційного автоматів. Операційний автомат має обчислювальні стани, у яких виконуються мікрооперації - перетворення даних, ініційовані сигналами керування автоматом. При цьому керуючий автомат визначає послідовність керуючих сигналів і виконання мікрооперацій у певній послідовності на основі граф-схеми алгоритму (ГСА), а також множину сповіщувальних сигналів, що виробляє операційний автомат.

Автоматна модель біт-потокowego online-обчислювача дробово-іраціональних функцій розроблена на основі кінцевого автомата моделі Мура, яка найбільш придатна для опису online-обчислювачів. Керуючий автомат пристрою описано графом переходів, який отримано в результаті розмітки ГСА арифметичного блока обчислювача (рис. 2).

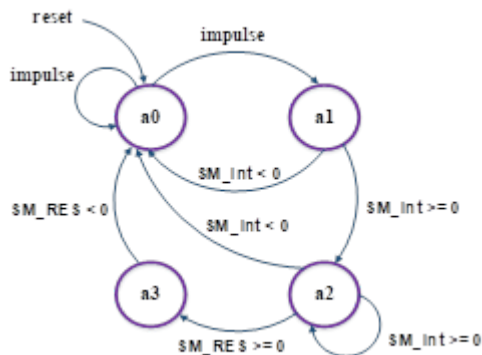


Рис. 2. Граф переходів керуючого автомата обчислювача дробово-іраціональних функцій

Граф забезпечує чіткість і наочність керування обчислювальними станами пристрою та має чотири стани. Стани a0, a1, a2 описують керування арифметичним блоком степеневого обчислювача. Стани a2 і a3 описують керування обчислювальними станами дільника чисел, у якому ділять результат проміжної степеневі функції на константу p.

У стані a1 відбуваються конвеєрні обчислення в компонентах пристрою прямого зв'язку архітектури степеневого обчислювача. Якщо значення регістра суматора $SM_int \geq 0$ додатне, то на виході суматора з'являється вихідний біт проміжної степеневі функції, і автомат переходить у стан a2. Якщо значення регістра суматора $SM_int < 0$ – від'ємне, автомат переходить у стан a0. У стані a2 виконуються конвеєрні обчислення в компонентах зворотного зв'язку архітектури степеневого обчислювача. Також у стані a2 в SM_RES вносять константу і підсумовують із вмістом SM_RES . Автомат

переходить у стан a3, якщо значення регістра суматора $SM_RES \geq 0$. У стані a3 від значення регістра суматора SM_RES віднімають значення регістра RG3, а також на виході суматора SM_RES буде сформовано вихідний біт пристрою, і автомат переходить у стан a0.

На підставі математичної моделі пристрою та його архітектури запропоновано ГСА операційного автомата реалізації дробово-іраціональної функції, що наведено на рис. 3.

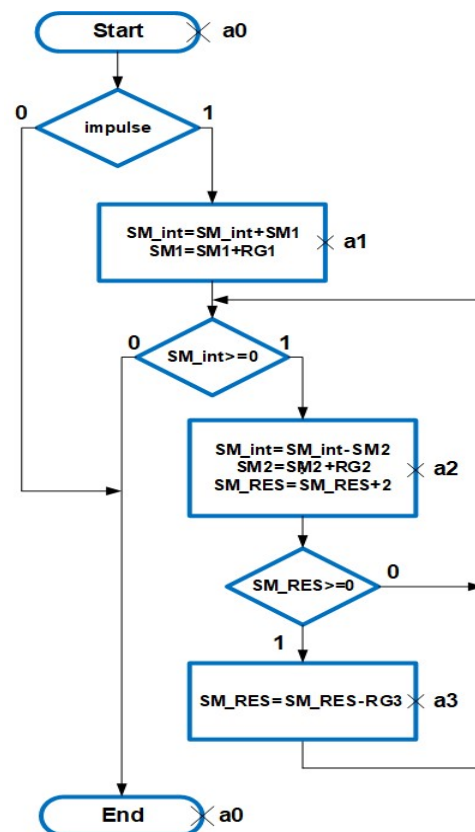


Рис. 3. ГСА операційного автомата реалізації дробово-іраціональної функції

Відповідно до ГСА біт-потокowego обчислювач працює за таким алгоритмом.

Зі скиданням пристрою за сигналом «reset» регістри встановлені у значення ініціалізації його компонентів. ГСА містить умовну вершину «impulse». З надходженням на вхід пристрою чергового «impulse» (біта) в арифметичному блоці обчислювача відбуваються конвеєрні обчислення: значення регістра суматора SM_int збільшується на значення регістра суматора SM1, значення регістра суматора SM1 збільшується на значення регістра RG1.

Якщо значення регістра $SM_int \geq 0$, то на його виході генерований вихідний біт, що є результатом обчислення проміжної степеневі функції $y_{int} := f(x)$, від значення регістра $SM_int \geq 0$ віднімають значення регістра суматора $SM2$, значення регістра суматора $SM2$ збільшують на значення регістра $RG2$. Також до значення регістра суматора SM_RES додають константу 2.

Якщо вміст регістра суматора SM_RES – невід’ємне число, то на його виході буде згенеровано біт y , що є вихідним бітом дробово-іраціонального обчислювача, за допомогою якого з регістра суматора SM_RES віднімають значення регістра $RG3$.

Висновки

Під час дослідження було розроблено моделі проектування апаратного обчислювача дробово-іраціональних функцій із бітовим потоком даних, що виконують обчислення в режимі реального часу. У пристрої реалізовано потоковий спосіб обчислень із паралельно-послідовним виконанням функціональних перетворень над бітами вхідного потоку.

Наукова новизна: запропоновано удосконалену математичну модель online-обчислювача дробово-іраціональних функцій, похибкою обчислень 0,5 одиниці молодшого біта аргумента, що є декомпозицією математичних моделей біт-потоків обчислювачів степеневих і лінійних функцій; математичні моделі отримано на підставі методу формування приростів ступінчастих функцій на основі обернених функцій; запропоновано узагальнену архітектуру біт-потоків обчислювача дробово-іраціональної функцій, за допомогою якої здійснюється двоетапне обчислення досліджуваної функції; запропоновано автоматну модель пристрою, графові моделі якої дали змогу забезпечити чіткість і несуперечність алгоритму реалізації дробово-іраціональних функцій.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні автоматної моделі online-обчислювача, яку сформовано на основі кінцевого автомата Мура. Графові моделі обчислювача дають змогу розробити HDL-модель пристрою у формі автоматного шаблону для реалізації алгоритмів відтворюваних дробово-іраціональних функцій інструментальними засобами САПР. Розроблені моделі досліджуваного пристрою забезпечують підвищення точності обчислення функції, розширюють частотний діапазон пристрою та суттєво зменшують витрати часу на процес проектування, що підвищує його ефективність.

Список використаних джерел

1. Najafi M. H., Faraji S. R., Bazargan K., Lilja D. Energy-efficient pulse-based convolution for near-sensor processing. *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Seville*. 2020. P. 1–5.
2. Shkil A. S., Larchenko L. V., Larchenko B. D. Bit-Stream Power Function Online Computer. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Sep 2020, Varna, Bulgaria*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224764.
3. Safyannikov N., Bureneva O. Bit-stream functional converters for decentralized sensor systems. *9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134176.
4. Chelebaev S.V., Chelebaeva Y. A. Converters Structures Synthesis of Time-and-Frequency Signals Parameters in the Code of Two Variables on the Radial Basis Network. *5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro*. 2016. P. 339–342. DOI: 10.1109/MECO.2016.7525776.
5. Kumar P. A. FPGA Implementation of the Trigonometric Functions Using the CORDIC Algorithm. *5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS), Mar 2019, Coimbatore, India*. 2019. P. 894–900. DOI: 10.1109/ICACCS.2019.8728315.
6. Sapper A. N., Soares L., Costa E., Bampi S. Exploring the Combination of Number of Bits and Number of Iterations for a Power-Efficient Fixed-Point CORDIC Implementation. *24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Dec 2017, Batumi, Georgia*. 2017. P. 302–305. DOI: 10.1109/ICECS.2017.8292079.
7. Rodriguez-Garcia A., Pizano-Escalante L., Parra-Michel R., Longoria-Gandara O., Cortez J. Fast Fixed-Point Divider Based on Newton-Raphson Method and Piecewise Polynomial Approximation. *International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig), Dec 2013, Cancun, Mexico*. 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/ReConFig.2013.6732291.
8. Korniienko V., Larchenko L., Parkhomenko A., Larchenko B. Design Models of Bit-Stream Online-Computers of Elementary Mathematical Functions. *12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Sep 2023, Dortmund, Germany*. 2023. P. 585–589. DOI: 10.1109/IDAACS58523.2023.10348885.
9. Апаратний біт-потоків online обчислювач дробово-раціональних функцій / Б. Д. Ларченко, О. С. Шкіль, Л. В. Ларченко та ін.

Радіoeлектроніка та інформатика. 2020. № 3. С. 55-63.

10. Шкіль О. С., Ларченко Б. Д., Ларченко Л. В. Декомпозиція математичної моделі апаратного біт-потокowego обчислювача ірраціональних функцій. *Радіoeлектроніка та інформатика*. 2019. № 4. С. 46-52.
11. Larchenko L. V., Parkhomenko A. V., Larchenko B. D., Korniienko V. R. Design Models of Bit-Stream Online-Computers for Sensor Components. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. Vol. 1(68). P. 48-61. DOI: [10.15588/1607-3274-2024-1-6](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-6).

Ларченко Л., Рожнова Т., Ларченко Б., Пахомов Ю. В. Моделі проєктування online-обчислювача дробово-ірраціональних функцій із бітовим потоком даних. У роботі запропоновано удосконалену математичну модель біт-потокowego online-обчислювача дробово-ірраціональних функцій із мінімізацією похибки обчислень, яку подано як декомпозицію математичних моделей поточкових обчислювачів степеневих і лінійних функцій, що дало змогу розширити функціональні можливості пристрою; узагальнену архітектуру дробово-ірраціонального обчислювача, що містить конвеєрні архітектури для підвищення швидкодії пристрою; автоматну модель пристрою, яку створено на основі кінцевого автомата; розроблено графові моделі, що забезпечують чіткість і несуперечність алгоритму обчислення дробово-ірраціональної функції. Досліджуваний обчислювач є ефективним із точки зору точності обчислення, простоти технічної реалізації та універсальності архітектури.

Ключові слова: функціональне перетворення, бітовий потік даних, біт-потоківі обчислення, математична модель, апроксимація, абсолютна похибка обчислень, автоматна модель, граф переходів, граф-схема алгоритму.

Larchenko L., Rozhnova T., Larchenko B. Pahomov Yu. V. Design models for online-computer of fractional-irrational functions with bit-stream data.

The work proposes design models of a bit-stream online computer of fractional-irrational functions. An improved mathematical model of an online computer with minimization of calculation errors has been developed, which is represented by the decomposition of mathematical models of streaming computers of power and linear functions, which allowed to expand the functional capabilities of the device and increase the frequency range of the input pulse flow. Mathematical models of devices were obtained based on the method of

forming increments of ascending step functions based on inverse functions. The absolute error of reproduction of the studied function is 0.5 units of the least significant bit of the argument.

A generalized architecture of a bit-stream computer of fractional-irrational functions is proposed, which contains a power function computing module and a number divisor module. An automaton model of the device is proposed, graph models are developed, which allow ensuring the clarity and consistency of the algorithm for implementing the fractional-irrational function to increase the clarity and invariance of the implementation in formal programming languages and hardware description.

The practical significance of the results obtained lies in the development of an automaton model of an online computer, which is formed on the basis of a Moore finite state machine. Graph models of the computer allow developing an HDL model of the device in the form of an automata template for implementing algorithms for reproducible fractional-irrational functions by CAD tools. The developed models of the studied device provide an increase in the accuracy of the function calculation, expand the frequency range of the device and significantly reduce the time spent on the design process, which increases its efficiency.

Keywords: functional conversion, bit-stream data, bit-stream computing, mathematical model, approximation, absolute calculation error, automata model, state diagram, algorithm flowchart.

Ларченко Ліна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, Україна, 61166. E-mail: lina.larchenko@nure.ua. <https://orcid.org/0000-0002-4326-1601>.

Larchenko Lina, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauka Avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166. E-mail: lina.larchenko@nure.ua. <https://orcid.org/0000-0002-4326-1601>.

Рожнова Тетяна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, Україна, 61166. E-mail: tetiana.rozhnova@nure.ua. <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>.

Rozhnova Tetiana, PhD, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauka Avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166. E-mail: tetiana.rozhnova@nure.ua. <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>.

Ларченко Богдан, канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, Україна, 61166. E-mail: bogdan.larchenko@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1298-4567>.

Larchenko Bogdan, PhD, Assistant of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauka Avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166. E-mail: bogdan.larchenko@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1298-4567>.

Пахомов Юрій канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17, Україна, 61002. E-mail: abc050073@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2267-8600>.

Pakhomov Yurii associate Professor of the Department of Computer Sciences and Information Technologies, Beketov Kharkiv National University of Urban Economy Kharkiv, str. 17, Marshala Bazhanov, Ukraine, 61002. E-mail: abc050073@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2267-8600>

МІРОШНИК М. А., доктор техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,

КУЛАК Е. М., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки,

КЛИМЕНКО Л. А., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Український державний університет залізничного транспорту,

МІРОШНИК А. М., PhD, ст. викл. кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки

Метод аналізу помилок умов переходів станів у графових моделях кінцевих автоматів для систем автоматизованого синтезу

Анотація: Запропоновано формалізований метод, орієнтований на використання в компіляторах САПР, для виявлення помилок в умовах переходів у графових моделях керуючих автоматів. За допомогою цього підходу можна не лише виявляти стани, де умови переходів описані з помилками, але й точно визначати місце виникнення таких помилок. Метод має функціонувати на етапі компіляції початкової мовної моделі автомата, що дає змогу знаходити проблеми до синтезу схеми, тим самим знімаючи з проєктувальника потребу в ручному аналізі вже після отримання хибного результату автоматизованого синтезу.

Ключові слова: граф переходів, умови переходів, керуючий автомат, автоматизований синтез, HDL-модель, компілятор САПР.

Вступ

Область дослідження. Методи та моделі опису кінцевих автоматів для систем автоматизованого синтезу. HDL-моделі автоматів, компілятори САПР.

Аналіз наявних рішень

У сучасній практиці цифрового керування найчастіше використовують мікропрограмні автомати та автомати з часовим логічним керуванням [1-3]. Однією з актуальних проблем під час використання САПР (систем автоматизованого проектування) для синтезу керуючих автоматів є некоректне формування умов переходів станів [4].

Проблеми подібного характеру виявлено у відомих САПР, зокрема Xilinx ISE і Xilinx Vivado, на етапі автоматичного синтезу. Замість тригерів із динамічним керуванням, рекомендованих для використання в сучасних синхронних цифрових схемах, синтезують тригери зі статичним керуванням, застосування яких може призвести до появи часових збоїв у роботі пристрою.

Основною причиною таких ситуацій здебільшого є некоректно описані умови переходів у HDL-моделі автомата або повна відсутність деяких переходів між станами.

© МІРОШНИК М. А., КУЛАК Е. М., КЛИМЕНКО Л. А., МІРОШНИК А. М., 2025

Особливо це характерно для автоматів логічного керування, де граф переходів може бути сформований як первинне подання моделі, на відміну від мікропрограмних автоматів, у яких граф переходів формується формально після виконання розмітки граф-схеми операційного пристрою. У випадку мікропрограмних автоматів імовірність помилок в умовах переходів знижена, хоча й тут можливі втрати окремих переходів між станами керуючого автомата.

Однак на стадії синтаксичної перевірки компілятором такі помилки не виявлені. У результаті після некоректного синтезу виникає необхідність у ручному пошуку джерела помилки. Що ще суттєвіше, доводиться повторно виконувати синтез, що потребує значних витрат часу, особливо коли йдеться про великі моделі.

У роботі [4] подано результати дослідження впливу некоректно визначених умов переходів на якість синтезу керуючих автоматів. Було виявлено, що подібні помилки можуть спричинити появу небажаних тригерів із статичним керуванням замість очікуваних тригерів із динамічним керуванням.

Щоб уникнути подібних помилок на етапі проектування, необхідно впровадити метод перевірки правильності опису умов переходів ще під час побудови графової моделі або на етапі семантичного аналізу в рамках інструментарію САПР.

Граф переходів, що описує поведінку керуючого автомата, має бути і синтаксично, і семантично коректним. Під час перевірки синтаксису необхідно контролювати досяжність усіх станів, повноту опису, відсутність логічних суперечностей і замикальних контурів, що можуть спричинити нескінченні цикли [5].

Поняття ортогональності є важливим і активно використовують під час аналізу надійності керуючих систем, а також для декомпозиції логічних функцій у процесі синтезу цифрових схем [6, 7] і перевірки правильності графових моделей цифрових автоматів [5, 8].

У публікаціях [4, 9] було доведено, що якщо функція умов переходів зі стану є ортогональною, то вона є повною та несуперечливою. Це стало основою для ідеї створення інструменту, за допомогою якого компілятори САПР можуть виявляти потенційні логічні помилки в описі переходів ще до етапу схемного синтезу, забезпечуючи тим самим більшу надійність і ефективність автоматизованого проектування.

Мета дослідження

Метою дослідження є створення методу виявлення помилок у логічних умовах переходів між

станами в графових моделях керуючих автоматів на основі аналізу ортогональності функції умов, що відповідають переходам зі стану, який розглядають.

Постановка задачі

Об'єкт дослідження — графові подання керуючих автоматів. Предмет дослідження — вивчення формальних характеристик помилок, що виникають в умовах переходів у графовій структурі автомата з використанням таблиці термів ортогональної логічної функції та вектора помилок.

Завданням дослідження є розроблення методу побудови моделі для формалізованого опису правильних умов переходів; дослідження всіх можливих видів помилок, що виникають у ортогональних логічних функціях; вивчення формальних характеристик помилок в умовах переходів у графових структурах керуючих автоматів; виявлення закономірностей у типових помилках і їх упорядкування; створення алгоритму для автоматизованого виявлення помилок; проведення практичного тестування запропонованого методу на прикладних задачах.

Основний матеріал

Спершу розглянемо суть ортогоналізації логічних функцій, що визначають умови переходів.

Кожна графова модель переходів має відповідати як синтаксичним, так і семантичним вимогам. У процесі перевірки синтаксичної коректності графа переходів необхідно враховувати такі властивості, як досяжність, повнота, відсутність суперечностей, а також відсутність циклів, що породжують нескінченні переходи [7].

У випадку перевірки логічних функцій, які задають умови переходів у керуючому автоматі, необхідно переконатися в їхній повноті й логічній узгодженості (несуперечності).

На рис. 1 зображено фрагмент графа переходів, де вершина a_i має K вихідних дуг.

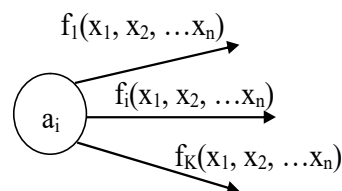


Рис. 1. Графічне відображення умов переходів у моделі керуючого автомата

Для кожної дуги задано логічний вираз, що описує умову переходу $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ у диз'юнктивній нормальній формі (ДНФ):

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \vee \dots \vee f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \vee \dots \vee f_K(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Повноту перевіряють для кожної його вершини шляхом дослідження логічних умов переходів, що відповідають усім дугам, які виходять з цієї вершини:

$$\bigvee_{j=1}^K f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1.$$

Повноту умов переходів визначають як охоплення всієї множини з 2^n термів, що відповідають булевим функціям переходів, де n — кількість вхідних змінних, які зумовлюють переходи з аналізованого стану. Тобто має бути виконана тотожність $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1$. Несуперечливість забезпечена перевіркою ортогональності булевих виразів, які описують умови переходів із кожної вершини графа: булеві функції, що відповідають різним дугам, не повинні мати спільних термів, тобто для кожної пари функцій $\forall (f_g \cdot f_h = 0), g \neq h$ [2].

Диз'юнктивну нормальну форму (ДНФ) булевої функції вважають ортогональною, якщо її кон'юнктивні терми є взаємно ортогональними, тобто кожен конкретний набір значень вхідних змінних задовольняє лише одну елементарну кон'юнкцію. У термінах карти Карно це означає, що області, що відповідають істинності кон'юнкцій, не перетинаються. Прикладом такої ортогональної структури є досконала диз'юнктивна нормальна форма (ДДНФ), яка складається з повної множини взаємно ортогональних кон'юнктивних термів [4].

Додатковим інструментом для візуального аналізу ортогональності повних булевих функцій є подання у вигляді бінарних дерев рішень у формі графа схеми алгоритму (ГСА), як це показано на рис. 2.

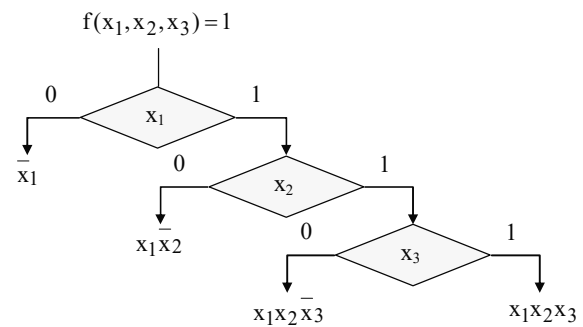


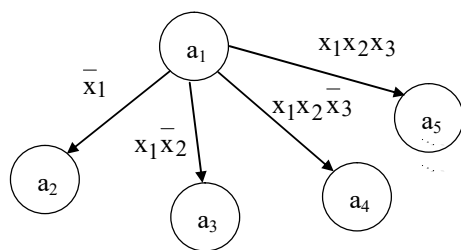
Рис. 2. Умови переходів для f ГСА

Коли функції умов переходів подано у вигляді бінарного дерева ортогональних рішень, існує можливість точно встановити необхідну кількість переходів. Якщо умови $x_1, x_2, \dots, x_n$ є незалежними між собою, то кількість таких переходів дорівнює $(m + 1)$, де m означає кількість умовних вершин дерева. При цьому слід зазначити, що вершини — це не змінні, оскільки одна й та сама змінна може фігурувати в декількох вершинах дерева.

Кількість переходів зі стану a_i , яка відповідає функції умов переходів, має бути більшою або дорівнювати $(n+1)$, де n — це кількість незалежних змінних.

На рис. 2 зображено дерево ортогональних рішень із лінійною структурою розгалуження, у якому відсутні повторювані умови (оскільки повторення не має додаткового смислового навантаження). Це дерево має три умовні вершини та чотири шляхи розгалуження, кожен із яких відповідає окремому терму ортогональної диз'юнктивної нормальної форми.

На рис. 3 подано граф переходів для функції f , побудований на основі ортогональних рішень. У подальшому для наочності та опису переходів використовуватимемо умовні позначення станів $a_1, a_2, \dots, a_k$ [4].

Рис. 3. Фрагмент графа переходів з умовами для f

Формула нижче відповідає функції f без помилок у виразі формули умов переходів ортогональної ДНФ:

$$f(x_1, x_2, x_3) = \overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_2 \overline{x_3} \vee x_1 x_2 x_3.$$

У табл. 1 наведено подання функції f у вигляді окремих термів (стовпців).

Таблиця 1

Таблиця для функції f

№	$x_1 x_2 x_3$	$\overline{x_1}$	$x_1 \overline{x_2}$	$x_1 x_2 \overline{x_3}$	$x_1 x_2 x_3$	err	
0	000	1	-	-	-	1	-
1	001	1	-	-	-	1	-
2	010	1	-	-	-	1	-
3	011	1	-	-	-	1	-
4	100	-	1	-	-	1	-
5	101	-	1	-	-	1	-
6	110	-	-	1	-	1	-
7	111	-	-	-	1	1	-

Таблиця, призначена для оцінювання повноти і несуперечності умов переходів, включає множину змінних, набір термів ортогональної функції переходів, а також вектор помилок. Для кожного

терму обчислюють відповідні значення на всіх можливих наборах змінних функцій умов переходів.

Вектор помилок, позначений як err, подано у вигляді стовпця, де кожен елемент вказує кількість одиничних значень у рядку, що відповідає певному набору змінних. У табл. 1 цей вектор складається виключно з одиниць, що свідчить про відповідність функції f ортогональній диз'юнктивній нормальній формі (ДНФ) умов переходів.

На початковому етапі доцільно класифікувати всі можливі помилки за певними категоріями:

- відсутність терму або окремої змінної в термі;
- некоректна інверсія змінної або всього терму;
- помилкове використання або заміна змінних місцями.

Розглянемо випадок втрати терму.

Якщо був втрачений терм $\overline{x_1}$ у функції f , вона матиме такий вигляд:
 $f_1(x_1, x_2, x_3) = x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_2 \overline{x_3} \vee x_1 x_2 x_3$. Ця функція зображена в табл. 2.

Таблиця 2 Т

Таблиця для функції f_1

№	$x_1 x_2 x_3$	$x_1 \overline{x_2}$	$x_1 x_2 \overline{x_3}$	$x_1 x_2 x_3$	err	
0	000	-	-	-	0	+
1	001	-	-	-	0	+
2	010	-	-	-	0	+
3	011	-	-	-	0	+
4	100	1	-	-	1	-
5	101	1	-	-	1	-
6	110	-	1	-	1	-
7	111	-	-	1	1	-

У табл. 2 можна побачити, що в стовпці помилки err зникли одиниці, натомість з'явилися нулі. В останньому стовпці знаками «+» виділені ці рядки. Можна також побачити закономірність, що ці нулі

збігаються з нулями у другому стовпці таблиці, і їм відповідає змінна x_1 функції f_1 .

Ми тут опускаємо безліч прикладів, використаних для дослідження, але слід зазначити, що з втратою терму з'являються нулі в егг, і в проекції цих нулів на другий стовпець можна визначити формулу терму. Якщо в проекції змінна x_1 не змінює своє значення і дорівнює 0, це буде $\overline{x_1}$, якщо дорівнює 1, то буде x_1 , а якщо змінює значення, ця змінна не увійде в терм.

Далі розглянемо втрату змінних у термах.

Якщо були втрачені у функції f (у термі $x_1 x_2 x_3$) змінні $x_1 x_2$, вона матиме такий вигляд: $f_2(x_1 x_2 x_3) = \overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_2 \overline{x_3} \vee x_3$. Ця функція зображена в табл. 3.

Таблиця 3

Таблиця для функції f_2

№	$x_1 x_2 x_3$	$\overline{x_1}$	$x_1 \overline{x_2}$	$x_1 x_2 \overline{x_3}$	x_3	егг	
0	000	1	-	-	-	1	-
1	001	1	-	-	1	2	+
2	010	1	-	-	-	1	-
3	011	1	-	-	1	2	+
4	100	-	1	-	-	1	-
5	101	-	1	-	1	2	+
6	110	-	-	1	-	1	-
7	111	-	-	-	1	1	-

У таблиці з'являються двійки в стовпчику егг. Втрата змінної розширює простір, який займає терм у карті Карно і, як наслідок, у таблиці повноти. Займаний простір завжди збільшується вдвічі, крім випадків, коли помилка виникає в термі максимальної довжини. У табл. 3 видно, що кількість рядків із значенням 2 у егг. непарна, тому що помилка тут у термі максимальної довжини.

Проведений аналіз виявлених помилок дає змогу встановити, що значення елементів вектора помилки егг у рядках, де зафіксовано некоректності, дорівнюють або 0, або 2, однак ці значення не

співіснують одночасно в межах одного рядка. Зокрема, у випадках, коли у складі терму відсутня змінна, відповідна область, яку він охоплює на карті Карно, подвоюється, що й обумовлює появу значення 2 у векторі помилок. Водночас значення 0 у векторі егг свідчить про повну відсутність відповідного терму у функціональному описі переходів. Оскільки площа, яку займає терм на карті Карно, визначена кількістю змінних у логічній функції, то, маючи інформацію про кількість змінних, виявлених помилок і значення вектора помилок, можна зробити аналітичні вирази для визначення розміру терму, у якому допущено помилку.

Далі розглянемо інверсію терму.

Якщо була зроблена помилкова інверсія терму $\overline{x_1}$, функція матиме такий вигляд:

$f_3(x_1 x_2 x_3) = x_1 \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_2 \overline{x_3} \vee x_1 x_2 x_3$. Ця функція зображена в табл. 4.

Т

Таблиця 4

Таблиця для функції f_3

№	$x_1 x_2 x_3$	$\overline{x_1}$	$x_1 \overline{x_2}$	$x_1 x_2 \overline{x_3}$	x_3	егг	
0	000	1	-	-	-	0	+
1	001	1	-	-	-	0	+
2	010	1	-	-	-	0	+
3	011	1	-	-	-	0	+
4	100	-	1	-	-	2	+
5	101	-	1	-	-	2	+
6	110	-	-	1	-	2	+
7	111	-	-	-	1	2	+

Аналізуючи дані, наведені в табл. 4, можна встановити, що у всіх восьми рядках вектор помилок $e_{\text{т}}$ має значення, відмінне від одиниці. При цьому у векторі зафіксовані як нульові, так і двійкові значення, причому їхня кількість є однаковою. Додатково, проаналізувавши координати, виявлено, що кожному рядку з нульовим значенням у векторі помилок відповідає рядок із двійковим значенням, для якого координата x_1 має протилежне значення.

Далі розглянемо переплутування змінних.

Якщо була зроблена помилкова заміна змінних x_1 на x_2 , x_2 на x_3 , x_3 на x_1 , функція матиме такий вигляд: $f_4(x_1x_2x_3) = \overline{x_2} \vee x_2 \overline{x_3} \vee x_2x_3\overline{x_1} \vee x_2x_3x_1$. Ця функція зображена в табл. 5.

Таблиця 5

Таблиця для функції f_4

№	$x_1x_2x_3$	$\overline{x_2}$	$x_2\overline{x_3}$	$x_2x_3\overline{x_1}$	$x_2x_3x_1$	$e_{\text{т}}$	
0	000	1	-	-	-	1	-
1	001	1	-	-	-	1	-
2	010	-	1	-	-	1	-
3	011	-	-	1	-	1	-
4	100	1	-	-	-	1	-
5	101	1	-	-	-	1	-
6	110	-	1	-	-	1	-
7	111	-	-	-	1	1	-

У табл. 5 помилок не видно, адже вектор $e_{\text{т}}$ має одиничні значення у всіх рядках. Це трапилося тому, що всі терми мають відмінний вигляд від початкових термів. Слід зазначити, що переплутування змінних – це дуже складний клас помилок, і в деяких виразах виявити помилку неможливо.

У наступному прикладі була зроблена помилкова заміна змінної x_1 на x_2 у термі $\overline{x_1}$. У цьому випадку функція матиме такий вигляд: $f_5(x_1x_2x_3) = \overline{x_2} \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1x_2\overline{x_3} \vee x_1x_2x_3$. Ця функція зображена в табл. 6.

Таблиця 6

Таблиця для функції f_5

№	$x_1x_2x_3$	$\overline{x_2}$	$x_1\overline{x_2}$	$x_1x_2\overline{x_3}$	$x_1x_2x_3$	$e_{\text{т}}$	
0	000	1	-	-	-	1	-
1	001	1	-	-	-	1	-
2	010	-	-	-	-	0	+
3	011	-	-	-	-	0	+
4	100	1	1	-	-	2	+
5	101	1	1	-	-	2	+
6	110	-	-	1	-	1	-
7	111	-	-	-	1	1	-

Проаналізувавши дані, наведені в табл. 6, встановлено, що, як і у випадках помилок, пов'язаних із втратою інверсії, кількість нульових значень у векторі помилок дорівнює кількості двійкових значень.

Розглядаючи окрему помилку, можна зіставити відповідні пари координат із нульовими та двійковими значеннями: 010 – 100, 011 – 101. Аналіз показує, що кожна така пара відрізняється за двома координатами, тоді як для одиничної помилки, пов'язаної лише із втратою інверсії, відмінність зафіксовано за однією координатою.

З метою спрощення процесу виявлення помилок запропоновано сформулювати метод, який передбачає послідовне виконання таких кроків.

Крок 1. Аналіз вектора помилок.

За наявності однієї помилки у функції вектор помилок може містити значення 0, 1 або 2. При цьому рядок зі значенням 1 свідчить про те, що у відповідній комбінації змінних помилка себе не проявляє. Отже, у векторі помилок можливі такі ситуації:

1) усі значення у векторі $e_{\text{т}}$ дорівнюють 1. Такий випадок вказує на відсутність виявлених помилок. Проте, як показано на прикладі функції f_4 , зі взаємною заміною змінних значення вектора помилок можуть залишатися рівними 1 у всіх рядках, незважаючи на наявність помилки. Це пояснюють тим, що утворюється нова функція, яка формально, за умовами, описана коректно. У межах цієї роботи випадки маскованих помилок не розглянуто, тому значення 1 у векторі помилок будемо трактувати як відсутність виявленої помилки для відповідного набору змінних;

2) усі значення у векторі егг дорівнюють 0, без урахування рядків із 1. Це свідчить про повне пропущення відповідного терму. Як показано на прикладі функції f_1 , у всіх випадках вектор помилок набував значення 0 у рядках, де була виявлена помилка, що відповідало повній відсутності терму у функції.

Далі для аналізу слід перейти до кроку 2 випадку 1;

3) усі значення у векторі егг дорівнюють 2, за винятком рядків зі значенням 1. Такий випадок свідчить про збільшення області покриття відповідного терму в таблиці аналізу повноти й несуперечності умов переходів. Це може відбуватися внаслідок пропуску змінної у складі терму. Аналогічні випадки були проаналізовані на прикладі функції f_2 . Для продовження аналізу необхідно перейти до кроку 2, випадку 1;

4) кількість рядків зі значенням 0 у векторі помилок дорівнює кількості рядків зі значенням «2». Таку ситуацію можна спостерігати на прикладі функції f_3 . За таких обставин неможливо однозначно визначити характер помилки без додаткового аналізу координат, у яких вона проявляється.

Слід зазначити, що наразі аналізують випадки, пов'язані з наявністю лише однієї помилки. До множинних помилок належать також випадки, де мала місце інверсія або перестановка змінних у межах одного терму, розмір якого перевищує одну змінну.

На наступному етапі необхідно попарно зіставити координати рядків із вектором помилок, що мають значення 0 та 2. Зазвичай відповідні пари рядків розташовані поряд у таблиці.

Коли існує некоректна інверсія змінних, координати рядків зі значенням 0 у векторі егг відрізняються від відповідних координат рядків зі значенням 2 лише за однією змінною. Натомість у випадках переплутування змінних ці відмінності охоплюють дві змінні. Відповідно на етапі 2 необхідно обрати правильний сценарій аналізу — випадок 2 або 3;

5) кількість рядків зі значенням 0 не дорівнює кількості рядків зі значенням 2. Подібні ситуації не були виявлені на розглянутих прикладах, однак їх наявність свідчить про існування декількох помилок різного характеру.

Крок 2. Аналіз кількості рядків із відмінними від 1 значеннями у векторі помилок.

На цьому етапі розглядають такі ситуації:

1) у випадку пропускання терму, маючи інформацію про кількість рядків, у яких вектор помилок має значення, відмінне від 1, можна визначити розмір пропущеного терму за допомогою формули

$$s = n - \log_2 R, \quad (1)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

n — загальна кількість змінних $(x_1, x_2 \dots x_n)$;

s — довжина повністю пропущеного терму.

Після цього слід перейти до кроку 4 та розглядати випадок 1.

2) пропускання змінної у складі терму. Після аналізу кількості відмінних зі значенням 1 на прикладах функцій f_2 та f_1 можна встановити, що ця кількість може бути і парною, і непарною. Така ситуація вказує на довжину терму, у якому було допущено помилку.

Непарна кількість відмінних значень вказує на те, що змінна була пропущена в термі, який займав мінімальну площу в таблиці або на карті Карно, тобто одну клітинку або один рядок. У такому випадку початковий терм без помилок містив n змінних. Кількість пропущених змінних можна визначити за допомогою формули

$$a = \log_2(R + 1), \quad (2)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

a — кількість змінних, пропущених у складі терму.

Парна кількість значень 2 у векторі егг ускладнює процес аналізу, оскільки стає неможливим безпосередньо визначити довжину терму, у якому допущено помилку. Проте розмір терму можна обчислити за допомогою формули

$$s = n - \log_2(2^{(\log_2 R)+1} - R), \quad (3)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

n — загальна кількість змінних $(x_1, x_2 \dots x_n)$;

s — довжина повністю пропущеного терму.

А кількість пропущених змінних можна обчислити за допомогою формули

$$a = \log_2(2^{(\log_2 R)+1}) - \log_2(2^{(\log_2 R)+1} - R), \quad (4)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

n — загальна кількість змінних $(x_1, x_2 \dots x_n)$;

a — кількість змінних, пропущених у складі терму.

Необхідно враховувати, що у формулах (3) і (4) у виразі $\log_2 R$, який знаходиться в показниковій частині основи 2, для коректних розрахунків слід

відкидати всю дробову частину. Для продовження аналізу необхідно перейти до кроку 3 випадку 1;

3) у разі некоректної інверсії змінних, як це проілюстровано на прикладі f_2 , спостерігають, що обидва варіанти — інверсія окремих змінних або всіх змінних у термі — призводять до аналогічного результату: терм змінює своє положення на карті Карно та утворюється рівна кількість значень 0 та 2 у векторі егг.

Відповідно у формулі (1) необхідно поділити кількість значень, відмінних від 1, на 2, що дає змогу вивести формулу для визначення довжини терму, у якому була допущена помилка:

$$s = n - \log_2 \frac{R}{2}, \quad (5)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

n — загальна кількість змінних ($x_1, x_2 \dots x_n$);

s — довжина повністю пропущеного терму.

Після цього слід перейти до кроку 3 випадку 2;

4) якщо переплутані змінні. У випадку переплутування змінних функція переходів набуває іншого вигляду. За таких умов помилка не проявляється у всіх рядках, що потребує зменшення розміру терму на одиницю. Відповідно довжину терму у випадках переплутування змінних можна визначити за формулою

$$s = n - \log_2 \frac{R}{2} - 1, \quad (6)$$

де R — кількість відмінних зі значенням, яке відрізняється від 1 у векторі егг;

n — загальна кількість змінних ($x_1, x_2 \dots x_n$);

s — довжина повністю пропущеного терму.

Далі слід йти до кроку 3 випадку 2.

Крок 3. Аналіз рядків щодо існування термів із помилкою.

Маючи визначену довжину терму, у якому допущено помилку, можна проаналізувати терми, у яких потенційно могла виникнути помилка, і виключити ті варіанти, що не відповідають встановленим розмірним критеріям. Залежно від характеру виявленої помилки умови відбору термів дещо відрізняться:

1) у разі пропускання змінної в термі, якщо кількість відмінних від 1 значень у векторі егг є непарною, розмір терму, де відбулась помилка, дорівнює n . Далі необхідно проаналізувати кожен із R рядків, у яких була зафіксована помилка, визначити відповідні змінні та методом виключення відкинути ті терми, розмір яких не відповідає умові $(n - a)$.

У випадку парної кількості змінних умова аналізу ускладнюється необхідністю окремого визначення розміру терму з помилкою. Отже, розмір аналізованих термів має дорівнювати $(s - a)$. Усі інші терми мають бути виключені з подальшого розгляду. Крім того, терм має бути присутнім у всіх рядках, де значення вектора помилок дорівнює 2;

2) у випадках некоректної інверсії та переплутування змінних умова аналізу є аналогічною: слід розглядати лише ті рядки, де значення вектора помилок дорівнює 2, і виключити всі терми, розмір яких не відповідає розрахованому на кроці 2 значенню s . При цьому варто враховувати, що, хоча підхід для визначення довжини терму у випадках некоректної інверсії та переплутування змінних схожий, відповідні формули розрахунку мають певні відмінності.

Крок 4. Аналіз позицій у рядках, де були знайдені помилки.

Розглянемо детально такі випадки:

1) якщо було втрачено цілий терм. У разі виявлення помилки, пов'язаної з втратою терму, слід проаналізувати всі координати рядків, для яких значення вектора егг дорівнює 0. Потрібно вибрати лише ті координати, символи яких залишилися незмінними, тобто не були модифіковані. Такий терм вважають втраченим. При цьому, якщо у відповідній координаті стоїть значення 1, змінну в термі слід записати без інверсії; якщо ж значення дорівнює -3 з інверсією;

2) якщо було втрачено змінну в термі. У цьому випадку аналізують координати рядків, де помилка не була виявлена, а також для термів, які не були відхилені на попередньому кроці (крок 3). Необхідно проаналізувати, у яких рядках зі значенням 1 вектора егг присутні ці терми, і попарно порівняти їхні координати з рядками, де вектор егг має відмінне від 1 значення. Якщо виявлено відмінність лише в одній змінній, можна зробити висновок про втрату саме цієї змінної. Після цього потрібно звернути увагу на значення цієї змінної в координатах рядків, для яких значення вектора егг дорівнює 1: якщо координата має значення 1, змінну в термі записують без інверсії, якщо 0 — з інверсією.

Однак можливі ситуації, коли на кроці 3 не вдається однозначно відкинути всі терми, окрім одного. У таких випадках неможливо остаточно встановити, у якому саме термі була допущена помилка. Розглянемо окремо такі випадки:

1) якщо з'явилася неправильна інверсія.

Порівнюючи попарно позиції рядків із відповідними значеннями вектора егг 2 та 0, можна виявити, у якій змінній сталася помилка. Далі, проаналізувавши значення цієї змінної в рядках із вектором егг 0, можна визначити правильне значення змінної: якщо координата дорівнює 1, змінну в термі слід записати без інверсії; якщо координата дорівнює 0 — з інверсією;

2) якщо змінні переплутані.

У випадках переплутування змінних у відповідних парах рядків зі значеннями вектора егг 2 та 0 відмінність спостерігатимуть у двох координатах. Для виявлення помилки слід проаналізувати, які рядки займають терми, що залишилися після кроку 3, і визначити спільну частину в координатах рядків із вектором егг 1 і рядків зі значенням 0. Ця спільна частина і буде відповідати терму без помилки.

Висновки

У результаті проведених досліджень створено модель, що описує коректні умови для переходів; досліджено формальні характеристики помилок в умовах переходів у графах переходів автоматів; упорядковано закономірності серед зафіксованих помилок; запропоновано метод виявлення помилок; проведено експериментальну перевірку запропонованого методу на конкретних прикладах.

Наукова новизна: запропоновано формалізований підхід для пошуку помилок в умовах переходів у графах переходів керуючих автоматів. За допомогою цього підходу можна не лише виявити стани з некоректно заданими умовами переходів, але й точно визначити місця виникнення таких помилок.

Практична значущість: за розробленим методом можна суттєво скоротити час на пошук причин некоректного автоматизованого синтезу автоматів у випадках некоректних умов переходів станів. Завдяки можливості автоматичного виявлення компілятором помилок HDL-моделі їх можна усунути до виконання синтезу, що знімає з проєктувальника потребу в трудомісткому ручному аналізі вже після отримання помилкового результату. Метод розрахований на використання в системах моделювання та САПР.

Список використаних джерел

1. Кривуля Г. Ф., Рябенський В. М., Рязанцев О. І. Комп'ютерна схемотехніка: підручник. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2009. 744 с.
2. Борисенко О. А. Цифрова схемотехніка: підручник. Суми : Сумський державний університет, 2016. 200 с.
3. Volnei A. P. Finite state machines in hardware : theory and design (with VHDL and SystemVerilog). The MIT Press Cambridge, 2013. 349 p.
4. Аналіз коректності графів переходів керуючих автоматів при побудові hdl-моделей для автоматизованого синтезу / О. С. Шкіль, Е. М. Кулак, І. В. Філіппенко та ін. *Радиоелектроніка та інформатика*. 2019. № 1 [84]. С. 28-34.
5. Рудий Т. В., Паранчук Я. С., Сенік В. В. Алгоритмізація та програмування : навч. посіб. Ч. 1. Структурне програмування. Львів :

Львівський державний університет внутрішніх справ, 2023. 240 с.

6. Мірошник М. А., Курцев М. С. Автоматизація проєктування вбудованих систем і програмних засобів на ПЛІС мовою опису апаратури : навч. посіб. Харків : УкрДУЗТ, 2021. 332 с.
7. Мірошник М. А., Клименко Л. А., Корольова Я. Ю. Технології та автоматизація проєктування цифрових пристроїв складних комп'ютерних систем на ПЛІС: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 220 с.
8. Автоматизированное проектирование систем логического управления с использованием шаблонов автоматного программирования / А. С. Шкіль, Э. Н. Кулак, И. В. Филиппенко и др. *Радиоелектроніка та інформатика*. 2018. № 3. С. 75-81.
9. Кораблев Н. М., Кулак Э. Н., Шакура А. Г. Подсистема синтеза конечных микрокомандных автоматов. *Матеріали ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління»*, Баку – Харків – Жиліна, 11-12 квітня 2019 р. 43 с.
10. Кулак Е. М., Погудін О. О., Кулак Г. К. Метод пошуку помилок в умовах переходів графових моделей керуючих автоматів. *Тези доповідей VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми інформатизації»*, Черкаси – Харків – Баку – Бельско-Бяла, 26-27 листопада 2020 р. С. 53.

Мірошник М., Кулак Е., Клименко Л. А., Мірошник А. Метод аналізу помилок умов переходів станів у графових моделях конечних автоматів для системи автоматизованого синтезу. У сучасній практиці цифрового керування найбільше використовують мікропрограми автоматів та автоматів з часовим логічним керуванням. Однією з актуальних проблем під час використання систем автоматизованого проєктування для синтезу керуючих автоматів є некоректне формування умов переходів станів. Проблеми подібного характеру виявляють у відомих САПР, зокрема Xilinx ISE і Xilinx Vivado, на етапі автоматичного синтезу. Замість тригерів із динамічним керуванням, рекомендованих для використання в сучасних синхронних цифрових схемах, синтезують тригери зі статичним керуванням, застосування яких може призвести до появи часових збоїв у роботі пристрою.

Основною причиною таких ситуацій здебільшого є некоректно описані умови переходів у HDL-моделі автомата або повна відсутність деяких переходів між станами. Особливо це характерно для автоматів логічного управління, де граф переходів формується як первинне подання моделі.

Однак на стадії синтаксичної перевірки компілятором такі помилки не виявлені. У результаті після некоректного синтезу виникає необхідність у ручному пошуку джерела помилки. Що ще суттєвіше,

доводиться повторно синтезувати, що потребує значних витрат часу, особливо коли йдеться про великі моделі.

Запропоновано формалізований метод, орієнтований на використання в компіляторах САПР, для виявлення помилок в умовах переходів у графових моделях керуючих автоматів. Цей підхід дає змогу не лише виявляти стани, де умови переходів описані з помилками, але й точно визначати місце виникнення таких помилок. Метод має функціонувати на етапі компіляції початкової мовної моделі автомата, що дає змогу знаходити проблеми до синтезу схеми, тим самим знімаючи з проєктувальника потребу в ручному аналізі вже після отримання хибного результату автоматизованого синтезу.

Ключові слова: граф переходів, умови переходів, керуючий автомат, автоматизований синтез, HDL-модель, компілятор САПР.

Miroshnyk M., Kulak E., Klymenko L. A., Miroshnyk A. Errors analysis method of state transitions conditions in FSM graph models for automated synthesis systems. In contemporary digital control practice, microprogrammed control units and finite state machines with temporal logic control are among the most widely used architectures. One of the pressing challenges in applying computer-aided design (CAD) systems for the synthesis of control automata is the incorrect specification of state transition conditions. Such issues are observed in well-known CAD environments, including Xilinx ISE and Xilinx Vivado, particularly at the stage of automatic synthesis. Instead of flip-flops with dynamic control – which are recommended for modern synchronous digital circuits—the tools tend to synthesize flip-flops with static control, whose application may lead to timing faults in device operation.

The primary cause of such errors typically lies in improperly defined transition conditions in the HDL (hardware description language) model of the automaton or in the complete omission of certain state transitions. This problem is especially common in logic-controlled automata, where the transition graph is constructed as the initial representation of the model.

However, such issues are not detected at the syntax-checking stage of compilation. As a result, incorrect synthesis necessitates manual error tracing. More critically, the synthesis process must be repeated, which significantly increases development time, particularly when dealing with large-scale models.

To address this issue, a formalized method is proposed for integration into CAD compilers, aimed at detecting errors in transition conditions within graph-

based models of control automata. This approach not only enables the identification of states with erroneous transition specifications but also provides precise localization of such errors. The method is designed to operate during the compilation stage of the initial language model of the automaton, thereby facilitating the identification of design flaws prior to circuit synthesis. This alleviates the designer's burden of manual debugging following an unsuccessful automated synthesis process.

Keywords: transition graph, transition conditions, control automaton, automated synthesis, HDL-model, CAD compiler.

Мірошник Марина, д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022.

Miroshnyk Maryna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor computer systems and robotics department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, Ukraine, 61022. E-mail: m.miroshnyk@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2231-2529>.

Кулак Ельвіра, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проєктування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, Україна, 61166. E-mail: elvira.kulak@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8441-5187>.

Kulak Elvira, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauka Avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166. E-mail: elvira.kulak@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8441-5187>.

Клименко Любов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Український державний університету залізничного транспорту, майдан Феєрбаха, 7, Харків.

Klymenko Liubov Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Specialized Computer Systems of the Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: klymenko.liubov73@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8252-7425>.

Мірошник Анатолій, канд. техн. наук, старш. викл. кафедри автоматизації проєктування обчислювальної техніки, Харківський національний

університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків,
Україна, 61166. E-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>.

Miroshnyk Anatolii. PhD, of Design Automation
Department, Kharkiv National University of Radio
Electronics, Nauka Avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166.
E-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>.

Канд. техн. наук ЗАДОРЖНИЙ А.О., Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

д-р. техн. наук СТАХОВСЬКИЙ О. В., Національний Університет Оборони

канд. техн. наук ЧОВНЮК Ю.В., Київський національний університет будівництва і архітектури

КЛІМОВ О.П., Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

ГРИНЮК В.В. Національний Університет Оборони.

Мехатронні модулі руху гусеничних машин: моделювання, теоретичний аналіз періодичних та стохастичних автоколивань у системах «двигун – регулятор швидкості обертання ротора

Анотація: робота присвячена моделюванню та теоретичному аналізу нелінійних стохастичних й періодичних коливань, які виникають у гусеничних машинах, із урахуванням ефекту інерційності регулятора швидкості обертання їх двигунів. У системах регулювання швидкості обертання машин, які належать до класу мехатронних модулів руху (ММР), зі зростанням чутливості регуляторів неминує виникати небезпека втрати стійкості до збудження автоколивань. Такі коливання, як показано у статті, можуть виявитись корисними, наприклад, для підвищення чутливості ММР.

Ключові слова: мехатронні модулі руху, гусеничні машини, моделювання, теоретичний аналіз, періодичні та стохастичні автоколивання, інерційність, чутливість, регулятор швидкості обертання ротора, двигун, динамічний хаос, метод точкових відображень, відображення Пуанкаре, діаграми Ламерея, біфуркації подвоєння циклів коливань.

Вступ.

Мехатронні системи управління рухом сучасних гусеничних машин (так звані мехатронні модулі руху – ММР) відрізняються збільшеною чутливістю регуляторів швидкості обертання таких механічних систем і, зокрема, їх двигунів. Але зі збільшенням чутливості регуляторів неминує виникати небезпека втрати стійкості регулювання швидкості обертання ротора двигуна, а це, у свою чергу, призводить до збудження автоколивань (як періодичних, так і стохастичних). У багатьох практичних випадках такі коливання-автоколивання можуть виявитись навіть корисними, наприклад, для підвищення чутливості керування регуляторів швидкості обертання ротору двигуна ММР гусеничних машин.

У сучасних керованих гусеничних машинах подібного типу (із вбудованим ММР) тенденція до зменшення моментів інерції частин, котрі обертаються, й збільшення жорсткості статичної характеристики двигуна призводить до необхідності враховувати перехідні процеси у самому двигуні. Дуже часто, час встановлення перехідних процесів, після закінчення котрого механічна система переходить до усталеного руху, у приводі двигуна виявляється одного порядку з постійною часу регулятора швидкості обертання ротора двигуна ММР. У даній роботі наведені результати дослідження стійкості стаціонарного режиму обертання валу двигуна-привода й характеру автоколивань поза межею стійкості функціонування регулятора ММР.

© ЗАДОРЖНИЙ А.О., СТАХОВСЬКИЙ О. В., ЧОВНЮК Ю.В., КЛІМОВ О.П., ГРИНЮК В.В., 2025

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Автори [1-15] досліджували різноманітні особливості режимів функціонування та коливання, які виникають у (гусеничних) машинах із урахуванням інерційності регулятора швидкості обертання двигуна, пропонували вібраційний спосіб лінеаризації деяких нелінійних систем, вивчали автоколивання у системах з інерційним збудженням, зокрема, це стосується робіт [1-5]. При цьому автори останніх цитованих робіт часто використовували метод точкових відображень задля дослідження динамічних систем та виникаючих у них режимів функціонування типу «динамічного хаосу», котрі, взагалі кажучи, є некерованими (або слабо керованими), як правило. Проте, подібні режими функціонування регуляторів швидкості обертання приводної системи ротора-двигуна гусеничної машини, котрі інтенсивно використовуються у сучасному виробництві, будівництві, різноманітних

технологічних процесах (і які до того ж керовані сучасними ММР), не досліджені. Саме цьому й присвячене дане дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета даної статті полягає у обґрунтуванні методу аналізу нелінійних коливань-автоколивань (періодичних та стохастичних), умов переходу регуляторів швидкості обертання ротора двигуна машини (за допомогою регулятора ММР) у режим функціонування типу «динамічного хаосу» та спряжених з ним біфуркацій подвоєння циклів (періодів) коливань.

Основна частина дослідження.

Схема регулювання швидкості обертання приводу (приводної системи двигуна) гусеничної машини за допомогою ММР наведена на рис. 1.

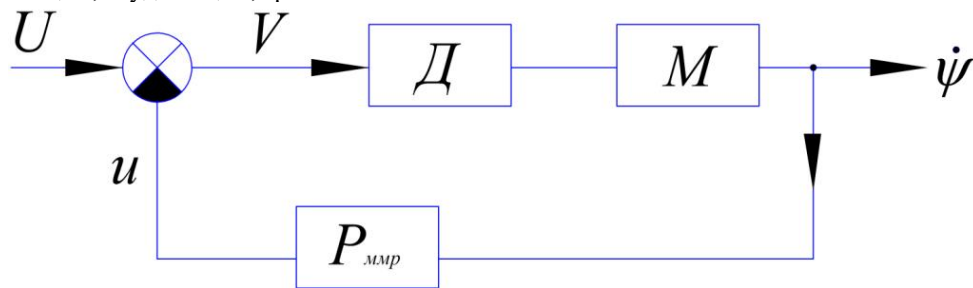


Рис. 1. Схема регулювання швидкості обертання приводу (приводної системи двигуна) гусеничної машини за допомогою ММР

На рис. 1 введені наступні позначення: U – програмне управління, u – сигнал зворотного (негативного) зв'язку, $v=U-u$ – керована величина, яка регулюється ММР, $Д$ – двигун, $М$ – механізм, $\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}$, Ψ – кут повороту ротора двигуна, t – поточний час, $P_{ММР}$ – регулятор ММР.

Рівняння обертання ротора двигуна гусеничної машини із урахуванням приведених мас передаточних та виконавчих механізмів має вид:

$$J \cdot \ddot{\Psi} = M_{\partial} - M_{on}(\dot{\Psi}), \quad (1)$$

де: J – приведений момент інерції (J не залежить від кута повороту ротора);

M_{∂} – обертальний момент двигуна;

$M_{on}(\dot{\Psi}) = \beta \cdot \dot{\Psi}$ – приведений момент сил

опору, $\ddot{\Psi} = \frac{d^2\Psi}{dt^2}$.

Рівняння для обертального моменту M_{∂} , із урахуванням часу τ встановлення перехідних процесів у двигуні машини, має вид [6,7]:

$$\tau \cdot \dot{M}_{\partial} + M_{\partial} = M(v, \dot{\Psi}), \quad (2)$$

де: $M(v, \dot{\Psi})$ – характеристика двигуна гусеничної машини, у якій присутні лінійна та нелінійна складові, залежні від v та $\dot{\Psi}$.

Рівняння регулятора, що здійснює негативний зворотний зв'язок за швидкістю обертання ротора двигуна, запишемо наступним чином:

$$\tau_p^2 \cdot \ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot \dot{u} + u = \kappa \cdot \dot{\Psi} + \Phi(\dot{\Psi}), \quad (3)$$

де: τ_p – постійна часу регулятора ММР;

ζ – безрозмірна величина, яка характеризує демпфування у регуляторі ММР;

κ – коефіцієнт чутливості регулятора ММР;

$\Phi(\dot{\Psi})$ – нелінійна функція, яка описує насичення регулятора ММР.

Розглянемо розв'язки системи рівнянь (1) – (3) для лінійної та нелінійної моделей руху даної механічної системи.

I. Лінійна постановка задачі. Стационарні розв'язки, які відповідають рівномірному обертанню ротора двигуна гусеничної машини з кутовою швидкістю Ω_0 .

1.1. Для лінійної постановки задачі й знаходження стаціонарних розв'язків системи рівнянь (1) – (3) використаємо наведені нижче співвідношення.

При рівномірному обертанні ротора двигуна гусеничної машини зі швидкістю Ω_0 маємо:

$$\begin{cases} M_{\partial 0} = \beta \cdot \Omega_0; & M_{\partial 0} = M(u_0, \Omega_0); & u_0 = \kappa \cdot \Omega_0; & U = 2 \cdot u_0; \\ u_0 = \Phi(\Omega_0) + \kappa \cdot \Omega_0; & \Phi(\Omega_0) \equiv 0. \end{cases} \quad (4)$$

Виділимо лінійні члени у околі стаціонарної точки характеристики двигуна:

$$M(v, \dot{\Psi}) = M(u_0, \Omega_0) - r \cdot (u - u_0) - \alpha \cdot (\dot{\Psi} - \Omega_0) - M^*(\dot{\Psi} - \Omega_0), \quad (5)$$

де: $M^*(\dot{\Psi} - \Omega_0)$ – доданок у (5), котрий відображає нелінійні властивості характеристики двигуна гусеничної машини, а тому для лінійної постановки задачі дорівнює нулю.

Параметри r та α - додатні, причому:

$$r = - \left(\frac{\partial M}{\partial v} \right) \Big|_{v=u_0, \dot{\Psi}=\Omega_0}; \quad \alpha = - \left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\Psi}} \right) \Big|_{v=u_0, \dot{\Psi}=\Omega_0}. \quad (6)$$

У результаті отримаємо лінеаризовану систему рівнянь виду:

$$\begin{cases} J \cdot \ddot{\Psi} = M_{\partial} - \beta \cdot \dot{\Psi}; \\ \tau \cdot M_{\partial} + M_{\partial} = -r \cdot u - \alpha \cdot \dot{\Psi}; \\ \tau_p^2 \cdot \ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot \dot{u} + u = \kappa \cdot \dot{\Psi}. \end{cases} \quad (7)$$

Система рівнянь (7) може бути зведена до одного звичайного диференціального рівняння для $u(t)$ четвертого порядку:

$$A \cdot u^{(IV)} + B \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + D \cdot u + E = 0, \quad (8)$$

де:

$$A = \tau \cdot J \cdot \tau_p^2; \quad B = \left\{ 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot \tau_p \cdot J + (J + \tau \cdot \beta) \cdot \tau_p^2 \right\}; \quad C = \left\{ \tau \cdot J + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot \tau_p \cdot J + (J + \tau \cdot \beta) \cdot \tau_p^2 \right\};$$

$$D = \left\{ J + \tau \cdot \beta + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot (\beta + \alpha) \right\}; \quad E = (\beta + \alpha + \kappa \cdot r).$$

Характеристичне рівняння для знаходження коренів λ (8) може бути розв'язане за алгоритмом й формулами Феррарі. У загальному випадку (8) має для $u = f \cdot \exp(\lambda \cdot t)$ чотири різних корені (які можуть, зокрема, бути дійсними, або комплексно спряженими) $\lambda_{1,2,3,4}$, які можна знайти з алгебраїчного рівняння четвертої степені для λ :

Тоді загальний розв'язок (8) набуває виду:

$$u(t) = \sum_{j=1}^4 f_j \cdot \exp(\lambda_j \cdot t) \quad (10)$$

Невизначені константи f_j можна знайти з термінальних (початкових та кінцевих) умов задачі:

$$u|_{t=0} = u_0; \quad \dot{u}|_{t=0} = \dot{u}_0; \quad u|_{t=\tau_p} = u_p; \quad \dot{u}|_{t=\tau_p} = \dot{u}_p. \quad (11)$$

Тоді для коефіцієнтів f_j , $j = \overline{1,4}$, з урахуванням (8) та (11), матимемо лінійну алгебраїчну систему чотирьох рівнянь, яка легко розв'язується за алгоритмом і правилом Крамера.

Знаючи закон зміни у часі t $u(t)$ з третього рівняння (7) знаходимо $\dot{\Psi}(t)$, а потім – з першого рівняння (7) $M_{\partial}(t)$.

1.2. Для стаціонарного розв'язку, що відповідає рівномірному обертанню ротора двигуна гусеничної машини з кутовою швидкістю Ω_0 слід розв'язати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} M_{\partial 0} = \beta \Omega_0; & M(v_0, \Omega_0) = M_{\partial 0}; \\ u_0 = \kappa \cdot \Omega_0; & \dot{\Psi} \equiv \Omega_0. \end{cases} \quad (12)$$

II. Нелінійна постановка задачі. Дослідження стійкості стану рівноваги системи.

Введемо відхилення від стаціонарного розв'язку: $x = \dot{\Psi} - \Omega_0$, $y = u - u_0$, а також відключимо M_0 – функцію з рівнянь (1) та (2), замінюючи її через інші змінні задачі, тоді прийдемо до наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = -k \cdot y - f(x); \\ \mu \cdot \ddot{y} + \dot{y} + \gamma \cdot y = a \cdot x + \varphi(x), \end{cases} \quad (13)$$

де:

$$2 \cdot \delta = \frac{\beta + 1}{J \cdot \tau}, \quad \omega_0^2 = \frac{(\alpha + \beta)}{\tau \cdot J}, \quad k = \frac{r}{\tau \cdot J}, \quad \beta = \left(\frac{\partial M_{0n}}{\partial \dot{\Psi}} \right)_{\dot{\Psi} = \Omega_0}, \quad a = \frac{\kappa}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_p}, \quad \mu = \frac{\tau_p}{2 \cdot \zeta}, \quad \gamma = \frac{1}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_p}. \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{M^*(x)}{\tau \cdot J}, \quad \varphi(x) = \frac{\Phi(\Omega_0 + x) - \Phi(\Omega_0)}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_p}. \quad (14)$$

Слід зазначити, що функція $f(x)$ є непарною, тобто: $f(-x) = -f(x)$.

Обмежуючи розклад нелінійних функцій кубічними членами, покладемо:

$$f(x) = h \cdot x^3, \quad \varphi(x) = -p \cdot x^2 - q \cdot x^3. \quad (15)$$

Для нормального функціонування регулятора необхідно, щоб його власна частота $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ була більшою ω_0 , тобто:

$$\frac{1}{\tau_p} > \sqrt{\frac{(\alpha + \beta)}{\tau \cdot J}}. \quad (16)$$

Звідси випливає, що μ можна вважати малим параметром, оскільки:

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} > \omega_0 \Leftrightarrow \frac{\gamma}{\mu} > \omega_0^2 \Leftrightarrow \mu < \frac{\gamma}{\omega_0^2}. \quad (17)$$

Дослідимо стійкість стану рівноваги $x = \dot{x} = y = \dot{y} = 0$. Згідно критерію Рауса – Гурвіца, особлива точка, яка відповідає цьому стану, аперіодично стійка. Умова коливної нестійкості у першому наближенні по μ має вид:

$$4 \delta^2 \cdot \gamma + 2 \delta \omega^2 + 2 \delta \gamma^2 - a \cdot k + \mu \left(8 \delta^3 \cdot \gamma + 4 \delta^2 \cdot \omega^2 - 4 \delta a k - 4 \delta \gamma \omega^2 \right) < 0 \quad (18)$$

З (18) видно, що самозбудження коливань виникає за рахунок інерційної взаємодії між змінними x та y (параметр γ не повинен перевищувати деякого критичного значення):

$$\gamma_{\text{крит.}} = -\delta + \left\{ \delta^2 + \frac{(a \cdot k - 2 \cdot \delta \cdot \omega^2)}{2 \cdot \delta} \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

Порівняння умови (18) для редукованої системи ($\mu = 0$) показує, що зі зростанням μ область нестійкості розширюється, тобто $\gamma_{\text{крит.}}$ (19) менше

$\gamma_{\text{крит.}}$ при $\mu \neq 0$:

$$\gamma_{\text{крит.}} < \gamma^*, \quad \gamma^* = \gamma_{\text{крит.}} (\mu \neq 0). \quad (20)$$

Дослідження характеру автоколивань регулятора ММР даної механічної системи у області нестійкості стану рівноваги проводилось за допомогою ПЕОМ.

Чисельний аналіз задачі виявив, що у залежності від параметрів виникаючі автоколивання механічної системи можуть бути як періодичними, так і стохастичними.

На рис. 2 у якості прикладу показані зони стохастичності на площині параметрів $(2\delta; k)$ для низки значень μ за фіксованих інших параметрів. З рис.2 видно, що зі зростанням μ не відбувається суттєвих змін розмірів зон стохастичності.

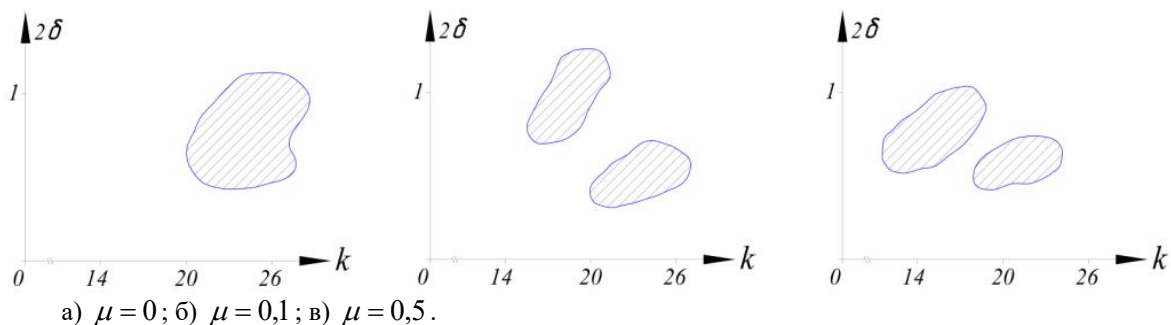


Рис. 2. Зони стохастичності на площині параметрів $(2\delta; k)$ для різних значень μ ($\omega_0 = 1$, $h = 20$, $\gamma = 1$, $p = 1$, $q = 1$, $a = 1$)

У зонах стохастичності збуджувані автоколивання мають суцільний спектр (Рис. 3, а) й автокореляційну функцію (Рис. 3, б). Поза зоною стохастичності спостерігаються періодичні автоколивання.

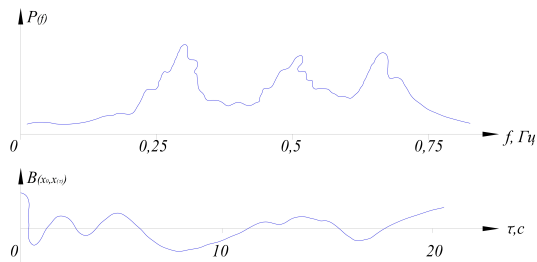


Рис. 3. Спектр (а) та автокореляційна функція (б) процесу $x(t)$ при $\omega_0 = 1$, $h = 20$, $\gamma = 1$, $p = 1$, $q = 1$, $\mu = 0,1$, $a = 1$, $k = 23$, $2\delta = 0,5$

У зв'язку із сучасними уявленнями про виникнення стохастичності у динамічних системах цікаво дослідити процес переходу від періодичних автоколивань до стохастичних.

III. Аналіз переходу механічної системи «двигун – регулятор швидкості обертання ротору ММР» від періодичних автоколивань до стохастичних при варіації коефіцієнту k .

Варіація коефіцієнту $k = \frac{r}{\tau \cdot J}$ здійснювалась при чисельному аналізі на ПЕОМ за сталих значень інших параметрів задачі ($2\delta = 0,5$; $h = 20$; $p = q = \omega_0 = \gamma = a = 1$).

З'ясувалось, що при: $k \geq k_0$, $k_0 = 1,25$ при $\mu = 0$; $k_0 = 1,08$ при $\mu = 0,1$ особлива точка з нульовими координатами (для $\dot{\Psi}$ та u , M_∂), а саме: $x = \dot{x} = y = \dot{y} = 0$, - втрачає стійкість й виникає граничний цикл, амплітуда котрого зростає при збільшенні k як $\sqrt{k - k_0}$. При $k = k_1$ ($k_1 = 13,8$, $\mu = 0$; $k_1 = 12,5$ при $\mu = 0,1$) одноктактний цикл з періодом T_0 втрачає стійкість – народжується двотактний цикл з періодом $2T_0$, котрий існує при $k_1 < k < k_2$, де $k_2 = 18,8$ для $\mu = 0$ й $k_2 = 17,9$ для $\mu = 0,1$. При $k = k_2$ двотактний

цикл втрачає стійкість й народжується чотирьохтактний цикл з періодом $4T_0$. При подальшому зростанні k – коефіцієнта чотирьохтактний цикл втрачає стійкість і народжується восьмитактний цикл з періодом $8T_0$. Графіки залежності від параметра k координати x точки перетину граничного циклу, площиною $\dot{x} = 0,2$ наведені на рис. 4 для $\mu = 0$ та $\mu = 0,1$.

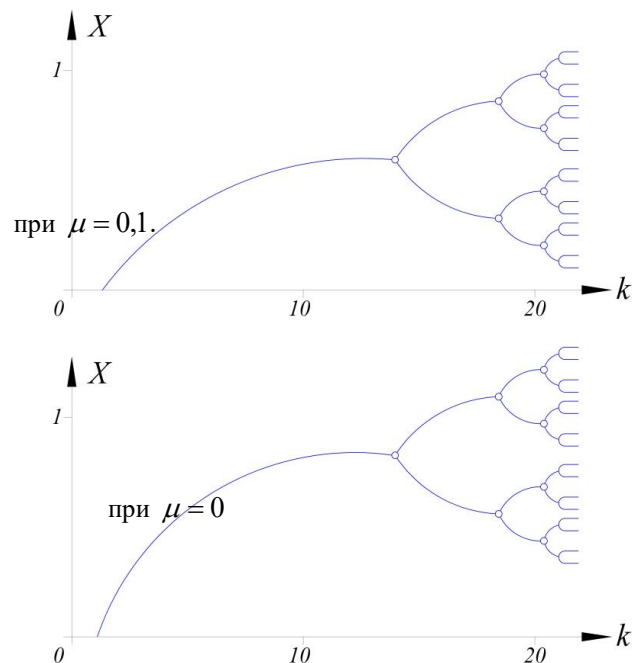


Рис. 4. Картина послідовних подвоєнь циклів.

На жаль, точно не вдалося визначити межу існування восьмитактного й наступного за ним при збільшенні параметра k шістнадцятитактного циклу (з періодом $16T_0$, $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, бо $\omega_0 = 1$). Наявність у розглядуваній механічній системі біфуркацій подвоєння періоду при зміні k – параметра нашої моделі наводить на думку про можливість опису їх за

допомогою модельного одновимірного відображення. З цією метою було побудоване відображення Пуанкаре [5]. Для розглядуваної системи січна «поверхня» відображення тривимірна. Виявляється, що на цій поверхні у зонах стохастичності відображення Пуанкаре витягнуте у тонкий джгут (Рис. 5).

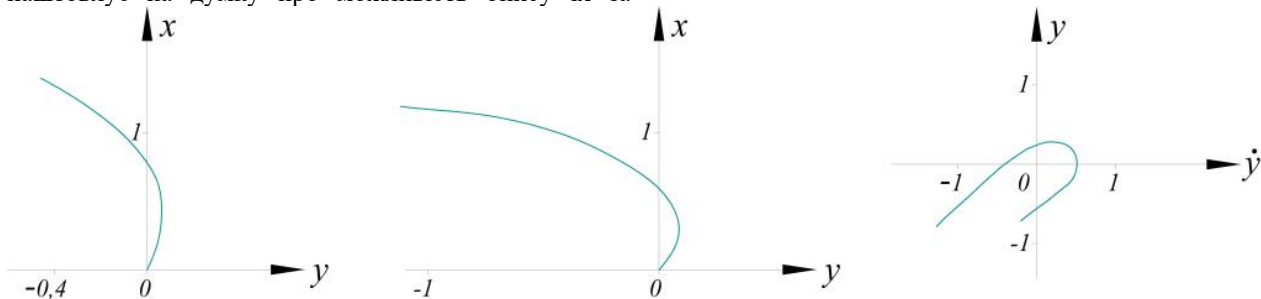


Рис. 5. Відображення Пуанкаре поверхні $(x, \dot{y}, y)$ у зонах стохастичності

Саме такий підхід дозволяє наближено замінити вказані відображення одновимірними у сенсі роботи [5], а потім побудувати відповідну їм діаграму

Ламерея $l_k = T(l_{k-1})$, де l_k – координата, яка відраховується вдовж джгута. Отримані діаграми для низки значень l_k (у вигляді діаграм Ламерея) подані на рис. 6.

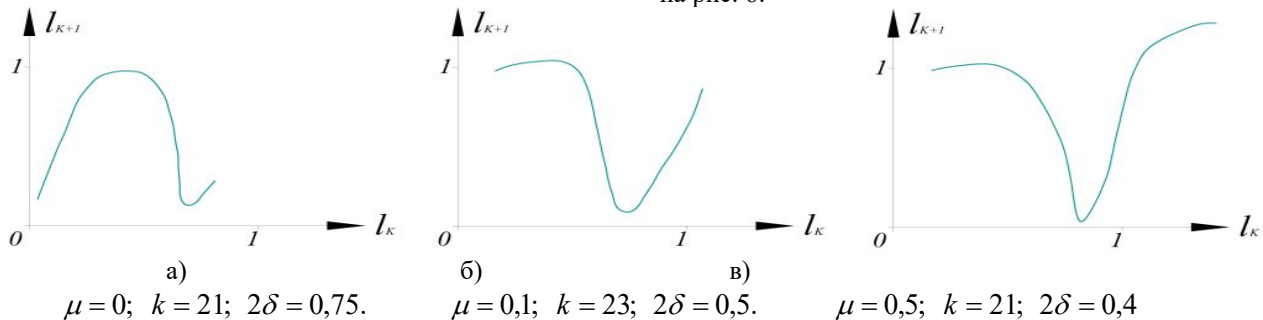


Рис. 6. Вид діаграми Ламерея при $\omega_0 = 1$; $h = 20$; $\gamma = 1$; $p = q = a = 1$.

Стохастичність у системі (13) стійка до зміни нелінійних характеристик. Так, при додаванні до функцій $f(x)$ виду (14) квадратичного члену $d \cdot x^2$ та варіювання знаку і величини d у широких межах – області стохастичності у просторі параметрів й характер автоколивань змінювались несуттєво.

Висновки.

Знайдені та досліджені у роботі стохастичні коливання у механічній системі «двигун гусеничної машини – регулятор швидкості обертання ротора ММР» за допомогою за допомогою мехатронної системи управління рухом (мехатронного модуля руху) можуть виявитись більш ефективними для цілей підвищення чутливості ММР, ніж традиційно застосовувані для цього періодичні автоколивання, оскільки останні часто призводять до небажаних ефектів резонансного типу.

Розроблені та науково обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі дозволяють суттєво підвищити чутливість регулятора швидкості

обертання ротора двигуна гусеничної машини при застосуванні саме ММР, якщо механічну систему «двигун гусеничної машини – регулятор швидкості обертання ротора ММР» ввести у режим стохастичних автоколивань.

Доведено, що подібний підхід може бути використаний у подальшому для проектування, моделювання подібних механічних систем як на стадії їх розробки, так і у режимах реальної експлуатації, а також задля уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів двигуна гусеничної машини та регулятора швидкості обертання його ротора при використанні сучасних мехатронних модулів руху (ММР).

Слід зазначити, що рівняння системи (13) мають узагальнюючий характер, описують доволі широке коло технічних та фізичних систем, у яких, мабуть, теж можуть спостерігатись автоколивання (періодичні та стохастичні), аналогічні дослідженим, котрі описані у роботах [8-15].

Список використаних джерел

1. David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 609 p.
2. Erika Ottaviano. Mechatronics for cultural heritage and civil engineering. Cham : Springer International Publishing, 2018. 372 p.
3. Гашук П. М., Зорій М. М. Лінійні моделі дискретно-неперервних механічних систем. – Львів: Українські технології, 1999. – 372 с.
4. Стоцько З. А., Сокіл Б. І., Топільницький В. І. Нелінійна модель руху шару середовища робочого контейнера вібраційних машин об'ємного оброблення виробів зі змінним параметром нелінійності // Машинознавство. – 2001. – №1(43). – С.19–23.
5. Антощенко Р.В., Нанка О.В., Лебедев А.Т., Антощенко В.М., Кісь В.М., Галич І.В. Мехатронні системи автомобілів і тракторів. Підручник. Харків. 2020. 219 с.
6. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle. Berlin : Springer-Verlag, 2005. 521 p.
7. Robert H. Bishop. Mechatronics. An Introduction. Boca Raton : CRC Press, 2006. 285 p.
8. Пересада С.М., Пушкар М.В. Основи мехатроніки. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 136с.
9. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. 357с.
10. Andrew I. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2020. 517p.
11. David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. – New York: McGraw – Hill Education, 2018. 609p.
12. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. Мехатроніка. Підручник. – К., 2020. 404с.
13. Артюх О.М., Дударенко О.В., Кузьмін В.В. та ін. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 372с.
14. Чумак В.В., Коваленко М.А., Котлярова В.В. Безконтактні регульовані електричні машини: практикум. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 55с.
15. Vladimir Rajs, Nikola Lj. Rasevic, Milan Z. Bodic, Miodrag M. Zukovic, Kalman B. Babkovic. PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non – Linear Load. IFAC PapersOnline 55-4 (2022). P. 225-229.

MECHATRONIC MODULES OF TRACKED VEHICLES: MODELING, THEORETICAL ANALYSIS OF PERIODIC AND STOCHASTIC SELF-OSCILLATIONS IN SYSTEMS "ENGINE - ROTOR SPEED CONTROLLER"

PhD (Tech.) A. Zadorozhnyi, Dr. Sc. (Tech.), O. Stakhovsky,
PhD (Tech.) Y. Chovnyuk, O. Klimov, V. Gryniuk.

Abstract. The work is devoted to modeling and theoretical analysis of nonlinear stochastic and periodic oscillations occurring in tracked vehicles, taking into account the effect of inertia of the engine speed controller. In speed control systems for machines belonging to the class of mechatronic motion modules (MMM), with an increase in the sensitivity of the controllers, there is an inevitable danger of losing stability to the excitation of self-oscillations. Such oscillations, as shown in the article, can be useful, for example, for increasing the sensitivity of the MMM.

In modern controlled tracked machines, there is a clear tendency to reduce the moments of inertia of rotating parts and to increase the rigidity of the static characteristic of the engine. This leads to the need to take into account transient processes in the machine engine. As a rule, the time of setting transient actions in the drive is revealed in the same order as the constant controller. This paper presents the results of a study of the stability of the stationary rotation mode and the nature of oscillations outside the stability limits (in the area of dynamic chaos). The stochastic oscillations self-oscillations identified and studied in the work, in particular, can be more effective for the purpose of increasing the sensitivity of the MMR than the traditional periodic self-oscillations, since the latter often lead to undesirable resonance effects. In some technological and testing tracked machines, it is useful to use stochastic self-oscillations as working processes.

Keywords: mechatronic motion modules, tracked vehicles, modeling, theoretical analysis, periodic and stochastic self-oscillations, inertia, sensitivity, rotor speed controller, engine, dynamic chaos, point reflection method, Poincaré map, Lamerey diagrams, oscillation cycle doubling bifurcation.

Задорожний Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент, старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

ORCID iD: 0000-0002-1031-0585. Тел.: +38 (066) 931-28-78. E-mail: zsnj1971@ukr.net

Стаховський Олег Валерійович, доктор техн наук, професор кафедри військової підготовки Національного Університету Оборони. ORCID iD: 0000-0002-9808-6302. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: dr.stahman@gmail.com

Човнюк Юрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичного виховання і спорту, Київський національний університет будівництва і архітектури, ORCID iD: 0000-0002-0608-0203. Тел.: +38 (096) 570 45 65. E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Клімов Олексій Петрович, начальник кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0003-0727-2976. Тел.: +38 (098) 283 50 21. E-mail: klimovaleksej800@gmail.com

Гринюк Володимир Володимирович, начальник кафедри військової підготовки, Національний Університет Оборони. ORCID iD: 0009-0003-0445-4376. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: vova.kira.alla@gmail.com

Zadorozhnyi Andriy Oleksiyovych, Associate Professor, PhD., Senior Lecturer, department of armored weapons and military equipment, Military Institute of Tank Troops of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". ORCID iD: 0000-0002-1031-0585. Тел.: +38 (066) 931-28-78. E-mail: zsnj1971@ukr.net

Stakhovsky Oleg Valeriyovych, Dr. Sc. (Tech.), professor of the department of military training National Defense University. ORCID iD: 0000-0002-9808-6302. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: dr.stahman@gmail.com

Chovnyuk Yuriy Vasyliovych, Associate Professor, PhD., department of physical education and sports, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0002-0608-0203. Тел.: +38 (096) 570 45 65. E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Klimov Oleksii Petrovich, Head the Armored weapons and military equipment department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". ORCID iD: 0000-0003-0727-2976. Тел.: +38 (093) 147-66-98. E-mail: klimovaleksej800@gmail.com

Gryniuk Volodymyr Volodymyrovych Head the Armored weapons of the department of military training National Defense University. ORCID iD: 0009-0003-0445-4376. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: vova.kira.alla@gmail.com

ФОМІН О. В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет

КОЗИНКА О. С., аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту

Класифікаційний підхід щодо вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів

Анотація. У статті розглянуто класифікаційний підхід щодо вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів. Запропоновано систему класифікації, яка враховує основні чинники експлуатаційного середовища, типи вібраційних навантажень, фізико-механічні властивості матеріалів покриттів і особливості конструктивних елементів вагонів. Такий підхід дає змогу оптимізувати процес підбору покриттів для підвищення довговічності та надійності залізничного рухомого складу. Результати дослідження можуть бути використані для проектування, модернізації та технічного обслуговування вантажних вагонів з урахуванням сучасних вимог щодо віброзахисту.

Ключові слова: залізничний транспорт, транспортні технології, вагони, ремонт, експлуатація, надійність, несучі системи, покриття захисні, автоматизація, комп'ютерне моделювання.

Вступ.

Сучасний залізничний транспорт відіграє головну роль у логістиці та економіці, а вантажні вагони є його основою, забезпечуючи перевезення значних обсягів продукції. Їхня надійність і довговічність є критично важливими для ефективності перевезень. Однак елементи вантажних вагонів постійно зазнають значних вібраційних навантажень, що спричиняють втому матеріалу, корозію, передчасний знос, і, як наслідок, часті ремонти і заміни, а це у свою чергу викликає значні фінансові витрати і операційні затримки. Зниження вібраційних впливів може суттєво подовжити термін служби компонентів.

Неконтрольовані вібрації також впливають на безпеку руху та можуть призвести до пошкодження транспортованого вантажу. Крім того, вібрації негативно впливають на комфорт і здоров'я навченого персоналу. Тому питання антивібраційного захисту є надзвичайно актуальним. Сучасні методи захисту часто не є оптимальними або мають обмежений термін ефективності. Вибір правильного антивібраційного покриття є складним завданням, що пов'язано з різноманітністю матеріалів вагонів, умов експлуатації та типів вібраційних навантажень. Відсутність систематизованого підходу для вибору покриттів призводить до неефективних рішень, оскільки часто застосовують універсальні покриття, які не забезпечують належного рівня захисту, або ж вибір відбувається емпіричним шляхом, що не гарантує оптимального результату.

Це підкреслює потребу в науково обґрунтованому підході.

Саме тут і полягає актуальність запропонованого науково-прикладного дослідження. Розроблення класифікаційного підходу дасть змогу систематизувати знання та врахувати всі чинники, що впливають на вибір покриття. Такий підхід допоможе ідентифікувати найбільш ефективні рішення для конкретних умов і оптимізувати процес вибору та застосування антивібраційних покриттів. Класифікація може бути базована на типах матеріалів, інтенсивності вібрацій, температурних режимах і агресивності середовища, а також урахувати вартість покриттів і легкість їх нанесення. Такий підхід допоможе розробити чіткі рекомендації для інженерів, щоб уникнути помилок із вибором і застосуванням захисних матеріалів.

Проведення цього дослідження дасть змогу істотно підвищити надійність елементів вантажних вагонів, що призведе до зменшення експлуатаційних витрат за рахунок подовження міжремонтних інтервалів. Буде збільшено термін служби вагонного парку в цілому, покращена безпека перевезень і зменшено пошкодження вантажів. Екологічний аспект також важливий, оскільки подовження терміну служби обладнання зменшує потребу у виробництві нового. Це дослідження дасть практичні інструменти для залізничної галузі, а його результати можуть бути інтегровані в нормативні документи і методичні рекомендації, що забезпечить уніфікований підхід для антивібраційного захисту і відкриє шлях для інноваційних розробок у сфері матеріалознавства.

механіки. Воно може стати основою для подальших наукових робіт, його результати будуть корисними для промислових підприємств, що виробляють та експлуатують залізничний рухомий склад, а також навчальних закладів, де готують фахівців для залізничної галузі. Упровадження класифікаційного підходу забезпечить більш раціональне використання ресурсів, дасть змогу створити більш ефективні та довговічні вантажні вагони і, як наслідок, підвищить конкурентоспроможність української залізничної системи на міжнародному ринку. Дослідження також може стимулювати розвиток вітчизняного виробництва антивібраційних покриттів, що забезпечить технологічну незалежність та економічне зростання. Отже, актуальність цього дослідження є беззаперечною для сучасної транспортної інфраструктури, а його результати матимуть широкий спектр застосувань і значний економічний ефект.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження [1] присвячене аналізу вібраційно-демпфуючих властивостей полімерних композитів для вантажних вагонів. Автори використовували експериментальні методи і моделювання для оцінювання ефективності різних матеріалів. Результати показали, що композити на основі поліуретану мають найкращі характеристики зменшення вібрацій порівняно з традиційними матеріалами.

У статті [2] подано огляд сучасних антивібраційних покриттів для залізничного транспорту. Автори класифікують матеріали за типом, властивостями та сферами застосування. Особливу увагу приділено полімерним і гібридним покриттям, які демонструють високу стійкість до динамічних навантажень.

Дослідження [3] зосереджене на оцінюванні в'язкоеластичних матеріалів для зменшення вібрації в елементах вантажних вагонів. Автори провели серію тестів на зносостійкість і демпфування, виявивши оптимальні матеріали для різних умов експлуатації.

У статті [4] запропоновано метод класифікації вібродемпфуючих матеріалів на основі їхніх механічних властивостей. Автори використовували алгоритми машинного навчання для прогнозування ефективності матеріалів у реальних умовах експлуатації залізничного транспорту.

Дослідження [5] присвячене проєктуванню та оптимізації багатошарових покриттів для віброізоляції вантажних вагонів. Автори використовували метод скінченних елементів для аналізу напружень і деформацій, що дало змогу підвищити ефективність покриттів.

У статті [6] розглянуто новітні тенденції в розробленні антивібраційних покриттів для залізничної галузі. Автори аналізують сучасні матеріали, такі як нанокомпозити, і їхні переваги порівняно з традиційними рішеннями.

Дослідження [7] порівнює демпфуючі властивості гумових і поліуретанових матеріалів для

вантажних вагонів. Експериментальні дані показали, що поліуретанові покриття мають кращу довговічність в агресивних умовах експлуатації.

У статті [8] проаналізовано вібродемпфування в елементах вантажних вагонів за допомогою композитних покриттів. Автори використовували метод скінченних елементів для моделювання динамічної поведінки матеріалів.

Дослідження [9] аналізує динамічну поведінку вантажних вагонів із різними типами антивібраційних покриттів. Автори виявили, що матеріали з високим коефіцієнтом демпфування значно знижують амплітуду коливань.

У статті [10] наведено експериментальне оцінювання в'язкоеластичних матеріалів для залізничних застосувань. Результати показали, що матеріали на основі акрилових смол мають високу ефективність у широкому діапазоні частот.

Дослідження [11] пропонує системний підхід для вибору матеріалів для вібродемпфування в залізничних компонентах. Автори розробили критерії оцінювання, що враховують механічні властивості та умови експлуатації.

У статті [12] описано розроблення високоефективних демпфуючих покриттів для важкого транспорту. Автори використовували нові полімерні композиції, що забезпечують стабільність за тривалих навантажень.

Дослідження [13] використовує машинне навчання для класифікації антивібраційних матеріалів у залізничній галузі. Алгоритми дали змогу прогнозувати ефективність матеріалів на основі їхніх фізико-хімічних властивостей.

У статті [14] проаналізовано динамічну поведінку вантажних вагонів із різними демпфуючими покриттями за ударних навантажень. Результати показали, що гібридні матеріали є найбільш ефективними.

Дослідження [15] поєднує експериментальні та чисельні методи для аналізу вібродемпфування у вантажних вагонах. Автори виявили, що багатошарові покриття зменшують вібрацію на 30-40 %.

Дослідження [16] присвячено теоретичному та практичному визначенню параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори аналізують ефективність використання таких систем для рекуперації енергії, зокрема в разі гальмування. Результати показують можливість зменшення енергоспоживання та підвищення економічної ефективності експлуатації.

У статті [17] розглянуто методи визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу підземного транспорту. Автори пропонують математичну модель для оптимізації ємності та швидкості заряджання, що дає змогу підвищити ефективність системи рекуперативного гальмування.

У статті [18] подано огляд сучасних технологій демпфування для вантажних вагонів.

Автори виділили головні чинники, що впливають на ефективність матеріалів, такі як температура і частота коливань.

Дослідження [19] присвячене оптимізації композитних покриттів для зменшення вібрації в залізничному транспорті. Автори використовували методологію Taguchi для підвищення ефективності матеріалів.

У статті [20] оцінено демпфуючі властивості еластомерних покриттів для вантажних вагонів. Результати показали, що матеріали на основі нітрильного каучуку мають високу зносостійкість.

Дослідження [21] зосереджене на визначенні динамічних навантажень на напіввагон за його фіксації в'язким з'єднанням на палубі порома. Автори використовують математичне моделювання для оцінювання впливу хитами на міцність кріплення. Результати показують, що в'язке демпфування зменшує динамічні навантаження на конструкцію.

У статті [22] проаналізовано довговічність несучої конструкції відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному поромі. Автори використовують методи скінченних елементів для оцінювання напружень і деформацій, що виникають під час морського переходу. Результати підтверджують надійність конструкції за умови правильного розподілу навантажень.

У дослідженні [23] проаналізовано останні досягнення в галузі полімерних демпфуючих матеріалів для залізниць. Автори виділили перспективні напрями, такі як використання нанонаповнювачів.

У статті [24] запропоновано методику ухвалення рішень для вибору антивібраційних покриттів у вантажному транспорті. Автори розробили систему оцінювання на основі багатокритеріального аналізу.

Виходячи з аналізу літератури, можна стверджувати, що питанню класифікаційного підходу для вибору антивібраційних захисних покриттів для елементів вантажних вагонів не приділено достатньої уваги. Сучасні дослідження здебільшого зосереджені на загальних аспектах віброзахисту або конкретних матеріалах, не систематизуючи їх вибір. Це створює труднощі для інженерів щодо підбору оптимальних покриттів, оскільки відсутній чіткий механізм класифікації та рекомендацій. Такий недолік може призвести до неефективного використання ресурсів і зниження експлуатаційної надійності вантажних вагонів. Розроблення чіткого класифікаційного підходу є критично важливим для підвищення ефективності віброзахисту і оптимізації процесів. Без належної уваги до цього питання впровадження новітніх технологій і матеріалів буде ускладнене.

Визначення мети та завдання дослідження.

Адаптивне застосування антивібраційних покриттів на основі їх класифікації для вантажних вагонів спрямоване на розроблення науково

обґрунтованих підходів для вибору та використання цих матеріалів. Метою дослідження є підвищення ефективності віброзахисту вантажних вагонів за рахунок оптимального підбору покриттів, що враховують специфічні умови експлуатації та характеристики вібрації. Кінцевим результатом стане зниження динамічних навантажень, підвищення надійності та довговічності елементів конструкції, а також покращення умов перевезення вантажів.

Для досягнення мети були вирішені такі завдання:

- класифікація існуючих антивібраційних покриттів за їхніми властивостями, ефективністю і умовами застосування;
- аналіз джерел вібрації та їхнього впливу на різні типи вантажних вагонів і вантажів;
- розроблення критеріїв вибору оптимального покриття для конкретних умов експлуатації, ураховуючи матеріал вагона, тип вантажу та інтенсивність вібрації;
- вплив еластомерних покриттів на динамічні характеристики візка вантажного вагона (зменшення вібрації і власних коливань);
- створення алгоритму адаптивного вибору та застосування покриття, який би давав змогу динамічно змінювати його тип або товщину залежно від поточних умов;
- розроблення рекомендацій з упровадження цієї системи в промисловість для підвищення довговічності вагонів і збереження вантажів.

Основна частина дослідження.

Сучасна експлуатація вантажних вагонів нерозривно пов'язана з постійним впливом динамічних навантажень, що генерують значні вібраційні коливання. Ці вібрації призводять до прискореного зносу елементів конструкції, руйнування зварних з'єднань, деформації металу, а також негативно впливають на термін служби вантажів і комфорт навченого персоналу. Сучасні методи віброзахисту, хоча й використовувалися, часто є недостатньо ефективними або економічно не виправданими, оскільки не враховують повної специфіки розподілу вібраційних навантажень на різних елементах вагона. Вибір антивібраційних захисних покриттів сьогодні здебільшого базований на емпіричних даних або загальних рекомендаціях, що не гарантує оптимального рішення для конкретних умов експлуатації.

Відсутність систематизованого підходу щодо класифікації вібраційних навантажень і відповідного підбору захисних матеріалів за їхніми характеристиками призводить до неефективного використання ресурсів і неповного розв'язання проблеми вібрації. Це створює нагальну потребу розробити класифікаційний підхід, який дасть змогу цілеспрямовано вибирати антивібраційні покриття з урахуванням індивідуальних особливостей елементів вантажних вагонів. Такий підхід має бути базований на глибокому аналізі джерел і характеристик вібрації,

а також властивостях різних типів захисних матеріалів.

Розроблення чітких критеріїв класифікації та ефективної методології вибору є основним етапом підвищення надійності та довговічності вантажного рухомого складу, що в кінцевому підсумку вплине на безпеку залізничних перевезень і призведе до зниження експлуатаційних витрат.

У конструкціях вантажних вагонів антивібраційні захисні покриття відіграють важливу роль у зниженні динамічних навантажень, підвищенні ресурсу елементів і забезпеченні комфорту і безпеки перевезень. Для досягнення необхідного рівня віброзахисту застосовують три основні групи інженерних матеріалів: металічні, полімерні та композитні.

Металічні матеріали. Металічні матеріали, зокрема сталь, алюміній і їхні сплави, використовують як несучі елементи у складі антивібраційних систем або як зовнішнє покриття з підвищеною зносостійкістю. У вигляді тонких прошарків чи вставок вони можуть виконувати функцію жорсткого обмежувача або демпфуючої оболонки. Найчастіше метали застосовують у комбінованих конструкціях разом із полімерними або еластомерними шарами. Переваги: висока механічна міцність, термостійкість, зносостійкість, добрі адгезійні властивості. Недоліки: низькі власні демпфуючі характеристики, велика маса.

Полімерні матеріали. Полімери, зокрема еластомери, поліуретани, гуми, ПВХ, активно використовують в елементах, які безпосередньо працюють на поглинання вібрацій. Найпоширеніші рішення включають гумові або поліуретанові подушки, прокладки, мастики, облицювальні шари, що наносять на деталі кузова та візка. Полімерні матеріали мають високий коефіцієнт внутрішнього тертя, що забезпечує ефективне поглинання енергії вібрацій. Переваги: відмінна вібродемпфуюча здатність, стійкість до атмосферного впливу, гнучкість, хімічна стійкість. Недоліки: обмежена механічна міцність, залежність властивостей від температури.

Композитні матеріали. Композитні матеріали на основі полімерної матриці з армуванням (скловолокно, вуглеволокно, арамідні волокна) застосовують для створення антивібраційних елементів із високою жорсткістю і малою масою. Вони ефективно поєднують демпфуючі властивості полімерів із міцністю армуючих компонентів. Їх часто використовують у вигляді сандвіч-панелей, панелей підлоги, перегородок або захисних накладок. Переваги: високе співвідношення міцності і маси, стійкість до втоми, корозійна стійкість, налаштовувані механічні характеристики. Недоліки: висока вартість, складність ремонту, чутливість до локальних пошкоджень. Для досягнення необхідного рівня віброзахисту застосовують три основні групи інженерних матеріалів: металічні, полімерні та композитні. На рис. 1 подано ієрархічну структуру інженерних матеріалів.

Залежно від призначення конструктивного елемента та умов експлуатації доцільним є використання як окремих матеріалів, так і комбінованих антивібраційних систем. Найбільш ефективними вважають багатошарові структури, що поєднують жорсткість металів, еластичність полімерів і високу питому міцність композитів. Такий комплексний підхід забезпечує надійний віброзахист елементів вантажних вагонів і подовжує термін їхньої експлуатації.

Оптимальний вибір матеріалу залежить від функціонального призначення елемента:

- для високого поглинання вібрацій – полімерні матеріали та еластомери;
- структурної підтримки з помірним демпфуванням – композити;
- зносостійких елементів з обмеженою амортизацією – металеві або комбіновані системи.

Комбінування цих матеріалів у вигляді багатошарових покриттів (наприклад метал + гума + полімер) забезпечує максимальний ефект віброзахисту у вантажних вагонах.

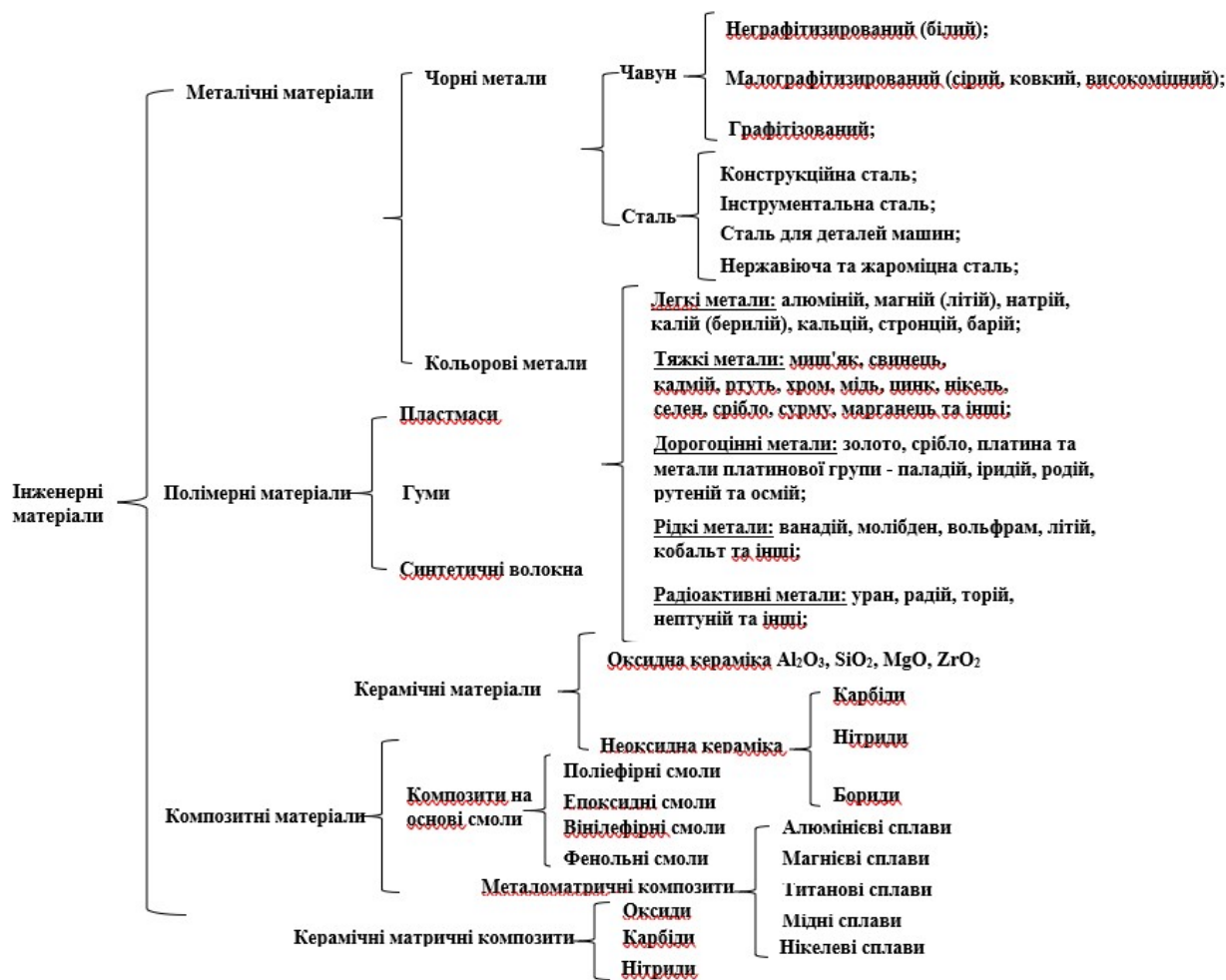


Рис. 1. Ієрархічна структура інженерних матеріалів

Еластомерні полімерні матеріали відіграють головну роль у забезпеченні антивібраційного захисту елементів вантажних вагонів, поглинаючи кінетичну енергію та зменшуючи передавання вібрацій. Їх класифікують за кількома критеріями, що відображують їхню хімічну будову, фізико-механічні властивості та сферу застосування.

1. Хімічна природа полімеру.

Натуральні каучуки (NR):

- висока еластичність, хороші динамічні властивості, морозостійкість;
- обмежена стійкість до олій та озону;
- використовувані в пружинах, амортизаторах, ущільненнях.

Синтетичні каучуки:

- бутадієн-стирольні каучуки (SBR): поширені, мають хороші механічні властивості, стійкість до стирання;
- бутадієнові каучуки (BR): висока еластичність за низьких температур, хороша зносостійкість;
- ізопренові каучуки (IR): властивості, близькі до натурального каучуку;

– нітрильні каучуки (NBR): відмінна маслостійкість, але нижча морозостійкість. Застосовують там, де потрібна стійкість до агресивних середовищ;

– хлоропренові каучуки (CR / Неопрен): хороша стійкість до погодних умов, озону, олій і вогню. Часто використовують для зовнішніх елементів;

– етилен-пропілен-дієнові каучуки (EPDM): висока стійкість до озону, атмосферних впливів, тепла та води. Широко застосовують в ущільненнях;

– силіконові каучуки (VMQ / MVQ): широкий діапазон робочих температур, висока термостійкість, хімічна інертність. Застосовують у спеціалізованих антивібраційних елементах;

– поліуретанові еластомери (PU): висока міцність на розрив, стійкість до стирання, висока твердість і несуча здатність. Використовують для виконавантажених елементів.

2. Фізико-механічні властивості.

– твердість: визначає жорсткість матеріалу (за Шором А або D), впливає на несучу здатність і демпфуючі характеристики;

– модуль пружності (Юнга): характеризує опір матеріалу деформації;

– коефіцієнт демпфування (втрат): показує здатність матеріалу розсіювати енергію вібрації. Чим вищий коефіцієнт, тим ефективніше демпфування;

– межа міцності та відносне подовження: характеризують здатність матеріалу витримувати навантаження без руйнування та деформацію до розриву;

– стійкість до агресивних середовищ: олій, паливо, вода, озон, ультрафіолетове випромінювання;

– температурний діапазон експлуатації: мінімальна та максимальна температура, за якої матеріал зберігає свої властивості;

– зносостійкість: важлива для елементів, що зазнають тертя.

3. Призначення та застосування у вантажних вагонах:

– елементи буксових вузлів: гумові прокладки, втулки, пружини, що демпфують вібрації від колісних пар;

– демпфуючі елементи візків: гумові амортизатори, пружні вставки, що знижують динамічні навантаження на раму вагона;

– пружні опори кузова: еластомерні подушки, що забезпечують ізоляцію кузова від вібрацій візка;

– ущільнення та прокладки: для герметизації з'єднань, що також можуть виконувати функцію демпфування дрібних вібрацій;

– елементи гальмівних систем: втулки та ущільнення, які також можуть впливати на вібраційні характеристики.

Ця класифікація допомагає інженерам вибирати найбільш прийнятний еластомер для конкретних умов експлуатації та вимог до антивібраційного захисту вантажних вагонів, забезпечуючи їхню надійність і довговічність.

Аналіз джерел вібрацій та їхнього впливу на різні типи вантажних вагонів і вантажів

У процесі експлуатації вантажного залізничного транспорту виникають різного роду вібрації, які суттєво впливають як на сам рухомий склад, так і вантаж. Вібраційні навантаження виникають під дією нерівностей колії, динаміки руху, а також технічного стану окремих елементів вагона. Для забезпечення довговічності конструкцій і збереження вантажу необхідно ідентифікувати джерела вібрацій, оцінити їхню дію та передбачити ефективні захисні заходи.

Основні джерела вібрацій у вантажних вагонах:

– нерівності залізничної колії (стики рейок, зношення шпал, колійні переходи), які спричиняють вертикальні та ударні коливання;

– неспіввісність коліс або осей, що провокує періодичні механічні збурення, які особливо проявляються на високих швидкостях;

– взаємодія пари «колесо – рейка», яка створює резонансні коливання у вертикальній і горизонтальній площинах;

– різкі зміни швидкості руху під час рушання, гальмування та маневрування, які формують імпульсні навантаження на конструктивні вузли;

– аеродинамічні впливи, що виникають із рухом на високій швидкості або в тунельних умовах;

– зношення ресорного підвісу, візків і амортизаторів, що знижує вібропоглинальні властивості конструкції.

Джерела вібрацій слід враховувати на етапі проектування вагонів. Зношення елементів візка призводить до резонансних частот. Найбільш ефективними для демпфування виявилися поліуретанові та армовані еластомерні покриття.

Кожен тип вантажного вагона має свої вразливі елементи. Вплив вібрацій на типи вантажних вагонів:

– напіввагони зазнають сильних вібрацій у хребтовій балці, дні кузова та місцях стику кузовних панелей. Особливо інтенсивні коливання виникають із перевезенням сипких вантажів, які нерівномірно розподілені по площині;

– платформи відчують динамічні імпульси в зонах кріплення контейнерів або техніки, зокрема на фітінгових вузлах;

– цистерни схильні до резонансних вібрацій через коливання рідинної маси всередині. Такий ефект створює періодичне навантаження на обичайку та опори цистерни;

– криті вагони мають розвинені вертикальні стінки, які передають високочастотні вібрації, що можуть спричинити мікропошкодження та розгерметизацію;

– хопери зазнають локальних ударів і вібрацій у нижній частині кузова, особливо під час розвантаження.

Особливо небезпечні для вантажу та вагонів низькочастотні (1–10 Гц) і середньочастотні (10–100 Гц) вібрації, які викликають матеріальну втомлюваність. Адаптація антивібраційного захисту до конкретних зон (наприклад хребтової балки або верхньої об'язки напіввагона) значно підвищує ресурс вагона.

Термопластичні еластомери – це клас полімерних матеріалів, які поєднують властивості еластомерів (гнучкість, пружність, еластичність) із можливістю термопластичної обробки (лиття під тиском, екструзія, пресування). ТРЕ-покриття застосовують у залізничній галузі завдяки високій стійкості до вібрацій, погодних умов і старіння.

Термопластичні еластомери є перспективним матеріалом для антивібраційного захисту конструктивних елементів вантажних вагонів. Їхня висока функціональність, універсальність у застосуванні та легкість у виготовленні робить ТРЕ доцільним вибором для умов інтенсивної експлуатації, особливо таких зон, як хребтові балки, кузови, пружні опори та вставки.

Вибір антивібраційного покриття для конструктивних елементів вантажних вагонів є

багатофакторним завданням, що потребує врахування умов експлуатації, типу вантажу, матеріалу основи, а також функціонального призначення захисного шару. Ефективність покриття визначена не лише його демпфуючими властивостями, але й стійкістю до механічних, хімічних і кліматичних навантажень.

Розглянемо критерії вибору антивібраційного покриття для вантажних вагонів.

1. Тип елемента конструкції. Хребтова та шворнева балки: найбільш навантажені зони, потребують міцного, зносостійкого покриття з високими антивібраційними властивостями. Кузов і днище: орієнтовані на шумопоглинання та захист від локальних вібрацій. Бокові стінки: менш навантажені, але підлягають ударному впливу вантажу.

2. Матеріал основи. Для сталених елементів – бажано покриття з хорошою адгезією до металу, стійке до корозії. Для алюмінієвих або композитних основ – важливо уникати розтріскування, забезпечити гнучкість і термічну стабільність покриття.

3. Тип вантажу. Сипкі вантажі (руда, щебінь): необхідні покриття з високою абразивною стійкістю. Хімічно активні вантажі: потрібна хімічна інертність (наприклад поліуретани, фторопласти). Вантажі, що бояться вібрацій (техніка, продукція): критично важливі ефективні вібродемпфуючі властивості.

4. Інтенсивність вібраційного навантаження. За високочастотних вібрацій рекомендовано застосовувати еластomers з високим внутрішнім тертям (наприклад EPDM, силіконові гуми). За

ударних навантажень – армовані гібридні покриття з комбінованими властивостями.

5. Кліматичні умови експлуатації. Для регіонів із низькими температурами – покриття, що не втрачають еластичність за морозних умов (TPU, силікони). У спекотному або вологому кліматі – гідрофобно-стійкі композиції.

6. Метод нанесення та ремонтпридатність. Перевагу мають покриття, які можна наносити без демонтажу елементів. Важливим чинником є можливість локального ремонту або заміни шару без повного видалення попереднього покриття.

7. Термін служби та економічна доцільність. Вибір залежить від вартості життєвого циклу покриття, де враховано витрати на матеріал, нанесення, обслуговування та утилізацію. В окремих випадках ефективнішими є дорожчі, але довговічні багатшарові системи, які зменшують частоту техобслуговування.

Оптимальний вибір антивібраційного покриття здійснюють на основі системного аналізу конструктивних особливостей вагона, характеру навантажень та умов експлуатації. Для найбільш ефективного результату рекомендовано застосовувати комплексні гібридні рішення, що поєднують вібродемпфуючі, антикорозійні та шумоізоляційні властивості. На рис. 2 зображено блок-схему класифікації антивібраційних покриттів.



Рис. 2. Класифікація антивібраційних покриттів

Еластомерні покриття, що застосовують для віброгасіння у візках вантажних вагонів, суттєво покращують їхні динамічні характеристики. Розглянемо фізичні властивості еластомерів: висока демпфуюча здатність (поглинають енергію коливань), стійкість до стирання (покриття кузова напіввагона), зносостійкість, робота в широкому температурному діапазоні.

Вплив на динамічні характеристики візка вантажного вагона:

1. Зменшення вібрацій і коливань. Під час руху вагона по нерівностях колії еластомерне покриття поглинає удари й коливання, зменшуючи передавання їх на раму вагона і вантаж. Це веде до зниження динамічного навантаження на конструктивні елементи. На рис. 3 зображений фрагмент кузова з візком напіввагона, який покритий рідкою гумою на основі бітумно-поліуретанового покриття.

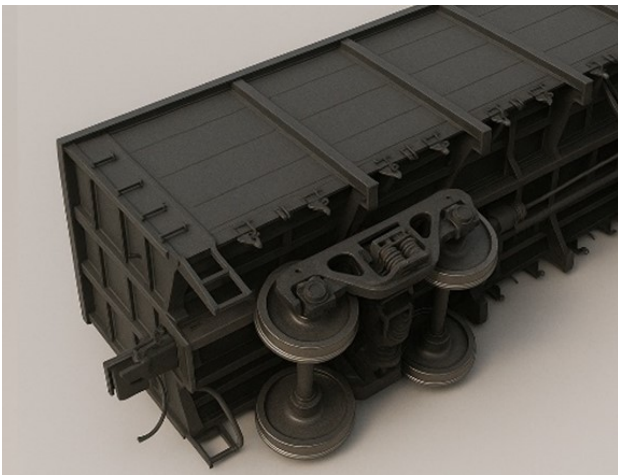


Рис. 3. Фрагмент кузова з візком напіввагона, який покритий рідкою гумою на основі бітумно-поліуретанового покриття

2. Підвищення плавності ходу. Завдяки гасінню високочастотних коливань покращено комфорт руху, навіть у важких умовах експлуатації (погана колія, великі швидкості).

3. Зменшення зносу. Демпфування ударів продовжує ресурс елементів візка (підшипників, ресор, колісних пар, рами). Зменшення динамічного навантаження також знижує зношування рейок і коліс.

4. Покращення стійкості до розгойдування та розбігу. Еластомери ефективно пригнічують горизонтальні і вертикальні коливання, зменшуючи ймовірність гребеневого удару та «змісподібного» руху.

5. Зниження рівня шуму. Амортизаційні властивості сприяють зменшенню акустичних коливань, що важливо для руху в населених пунктах.

Еластомерні елементи можна застосовувати у візках: буксових вузлах (демпфуючі прокладки), підвісках (еластомерні елементи замість або разом із металевими пружинами), з'єднаннях між візком і кузовом, гальмівній системі (віброгасні втулки та ущільнення).

Приклади застосування еластомерних елементів: візки типу 18-100 – модернізовані з елементами еластомерного демпфування; візки нових поколінь (наприклад Barber S-2-R) – використовують еластомерні елементи в бічних опорах; європейські вантажні вагони (Y25, Minden-Deutz) – оснащені гумо-металевими амортизаторами (рис. 4).

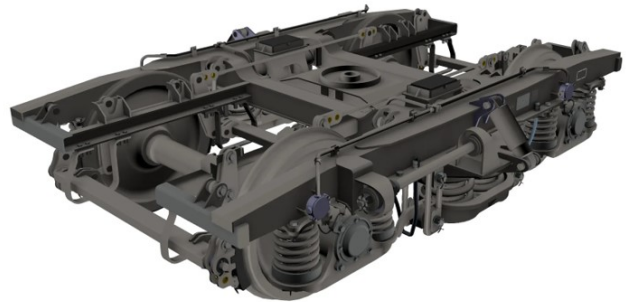


Рис. 4. Європейський вантажний візок (Y25, Minden-Deutz) оснащений гумо-металевими амортизаторами

За допомогою методу автоматизованого розрахунку реалізовано метод кінцевих елементів (МКЕ) у програмі SolidWorks Simulation. Проведемо модальний аналіз фрагменту верхньої обв'язки напіввагона (без покриття), товщина металу 7 мм і з еластомерним покриттям товщиною 10 мм (рис. 5).

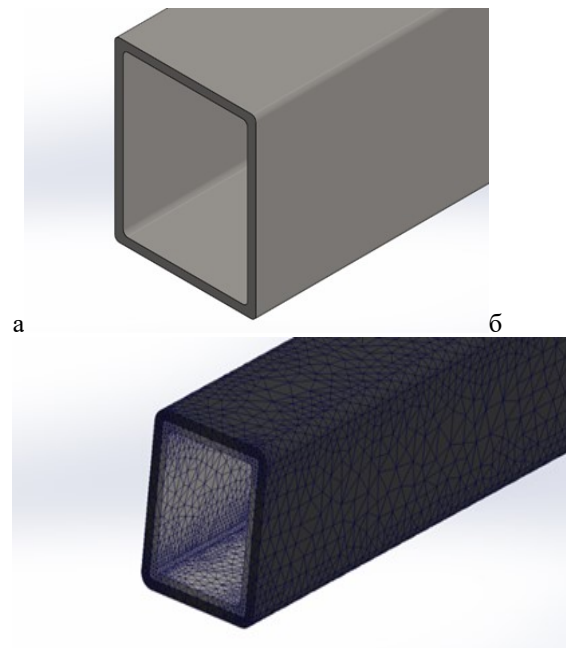


Рис. 5. Фрагмент верхньої обв'язки напіввагона:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Власні частоти (резонансні частоти) конструкції – це частоти, на яких конструкція сама буде коливатися після відхилення від положення рівноваги. З частотного аналізу ми можемо визначити власні частоти конструкції, а також форми її вібраційної реакції або моди.

Резонанс – це явище стрімкого зростання амплітуди змущених коливань системи, яке настає під час наближення частоти зовнішньої дії до певних значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи.

Проведемо частотний аналіз (із кріпленням). Без покриття і з еластомерним покриттям, покриваючи металеву деталь 7 мм покриттям товщиною 10 мм. Фіксуємо деталь із двох боків, з одного боку (лівого) вибираємо фіксовану геометрію (Fixed Geometry), а з іншого (правого) боку беремо нежорстке закріплення (Roller/Slider).

Розбиття моделі на кінцево-елементну сітку (Meshing). Максимальний розмір елемента – 49,6101 мм, мінімальний розмір елемента – 3,06147 мм, усіх вузлів – 533966, усіх елементів – 325233. На рис. 6 зображено список резонансних частот і коефіцієнти масової участі п'яти форм коливань.

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	554,55	88,259	0,01133
2	661,94	105,35	0,0094921
3	2 685,9	427,47	0,0023394
4	2 848,5	453,36	0,0022057
5	3 207,4	510,48	0,0019589

Mode No.	Freq (Hert: X direction)	Y direction	Z direction
1	88,259	0,69788	5,51E-12
2	105,35	4,81E-12	0,69751
3	427,47	0,13978	9,62E-11
4	453,36	2,05E-09	3,21E-09
5	510,48	7,53E-11	0,14003

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	505,11	80,391	0,012439
2	602,84	95,945	0,010423
3	2435,8	387,68	0,0025795
4	2510,8	399,6	0,0025025
5	2896,2	460,94	0,0021695

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	80,391	0,69786	1,58E-10	4,87E-13
2	95,945	1,41E-10	0,69748	2,14E-13
3	387,68	0,13958	7,32E-10	4,61E-11
4	399,6	8,80E-08	3,94E-10	8,06E-13
5	460,94	1,05E-09	0,13942	3,61E-10

Рис. 6. Список резонансних частот і коефіцієнти масової участі:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Коефіцієнти масової участі важливі для визначення відповідності обчислених форм коливань із розв'язанням динамічних задач із рухом основи. Цей коефіцієнт визначає відсоток маси системи, задіяної в конкретній формі, і надає міру енергії, зосередженої в кожній резонансній формі. Режим із великим коефіцієнтом масової участі зазвичай суттєво впливає на динамічні реакції системи. Для багатьох

програм потрібно, щоб щонайменше 80 % маси системи брало участь у заданих напрямках – X, Y, Z.

Щоб верхня обв'язка не деформувалася під впливом коливань, не входила в резонанс, робоча частота має відрізнятися. На графіку відгуку бачимо (рис. 7), що значення частоти зростає зі збільшенням номера форми коливань.

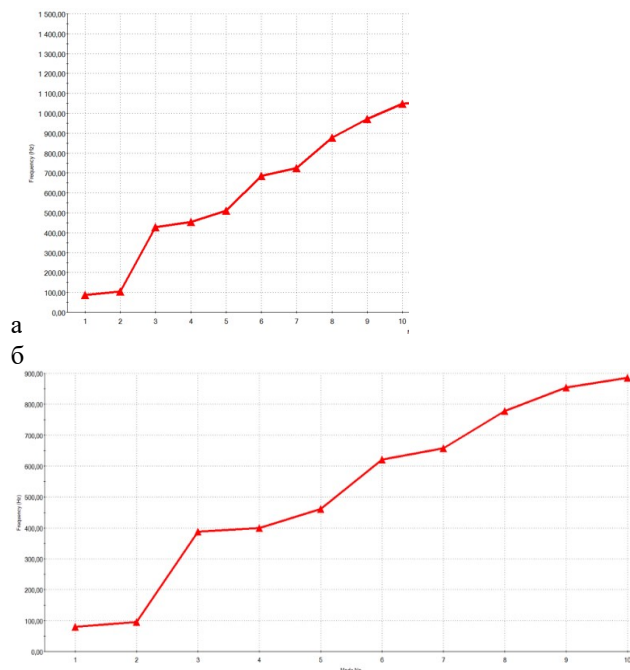


Рис. 7. Графік відгуку:

а – без покриття; б – з еластомерним покриттям

Відгук конструкції на високих частотах набагато слабший, ніж на низьких частотах.

За допомогою частотного аналізу ми повинні задовольнити умову вібростійкості, тобто власні коливання конструкції не повинні збігатися за частотою робочих коливань. Зменшення власної частоти зі зростанням товщини антивібраційного покриття призводить до нелінійного зниження частоти. Бачимо, що резонансні частоти з еластомерним покриттям зменшуються.

Створення алгоритму адаптивного вибору та застосування покриття, яке динамічно змінює свій тип або товщину залежно від поточних умов експлуатації вантажних вагонів, є складним, але перспективним завданням. Такий підхід може значно підвищити ефективність захисту, оптимізувати витрати і продовжити термін служби елементів.

Розглянемо основні етапи та компоненти, які необхідні для розроблення алгоритму адаптивного вибору:

1. Збір і аналіз даних про умови експлуатації. Це фундаментальний етап, оскільки адаптивний вибір базований на даних про поточні умови. Датчики на вагоні.

Датчики вібрації/прискорення

(акселерометри): вимірювання рівня вібрацій на різних ділянках вагона (днище, борти, рама) під час руху та завантаження/розвантаження. Можна використовувати модулі на кшталт NI 9237 у поєднанні з тензорезисторами або окремі акселерометри. Датчики температури: моніторинг температури зовнішнього середовища та поверхні вагона. Датчики вологості: моніторинг вологості повітря. Датчики ударів/навантаження: наприклад, тензодатчики ДЭДВУ-20 для контролю за ударними навантаженнями під час завантаження/розвантаження. GPS/Системи позиціонування: для визначення маршруту і погодних умов у регіоні.

Інформація про вантаж. Тип вантажу: абразивний (щебінь, руда, вугілля), хімічно активний (сіль, міңдобрива), рідкий, сипкий тощо. Об'єм/Маса вантажу: впливає на навантаження та вібрації. Стан інфраструктури: тип залізничної колії, стан розвантажувальних механізмів.

2. Моделювання та прогнозування. Для розуміння, як різні умови впливають на поведінку вагона та покриття. Математичні моделі (динамічні моделі вагона): із використанням програмного забезпечення Ansys LS-DYNA (для ударних навантажень) або MSC.Marc (для нелінійного аналізу деформацій) можна моделювати реакцію вагона на різні навантаження та вібрації.

Моделі поведінки покриття: як різні типи полімерних покриттів (поліуретани, полісечовини, ПВХ-композити) і їхня товщина впливають на вібродемпфуючі та шумопоглинаючі властивості за різних температур і частот.

Прогнозування зносу та деградації: розроблення моделей, які прогнозують швидкість зносу або корозії покриття залежно від типу вантажу, інтенсивності вібрацій і зовнішніх умов.

3. Створення бази даних із детальними характеристиками різних типів покриттів. Тип покриття: поліуретанове, полісечовинне, бітумно-полімерне, ПВХ-композитне тощо. Фізико-механічні властивості: віброгасіння (коефіцієнт демпфування, втрати енергії на різних частотах), зносостійкість (стійкість до абразивного зносу), міцність на розрив, відносне видовження, твердість, за Шором, хімічна стійкість, температурна стійкість, товщина (оптимальний діапазон товщин для кожної властивості), вартість (вартість матеріалу та нанесення). Технологія нанесення (вимоги до обладнання, часу затвердіння).

Рекомендації щодо впровадження цієї системи вибору покриттів для підвищення довговічності вагонів і збереження вантажів:

- включити модуль адаптивного покриття в технічні умови на виготовлення нових типів вагонів;
- здійснити типові випробування на найбільш вібронавантажених елементах (хребтова та шворнева балки);

– у межах державної програми модернізації вагонного парку передбачити часткове фінансування розгортання технології в депо;

– створити електронну базу даних умов експлуатації для формування динамічної системи рекомендацій щодо вибору покриття.

Запровадження системи адаптивного вибору антивібраційного покриття є ефективним шляхом для підвищення експлуатаційної надійності вантажних вагонів, зменшення технічних витрат і забезпечення високого рівня збереження вантажів. Розвиток такого напряму сприятиме переходу до більш гнучкої, ресурсозберігаючої та цифровізованої залізничної логістики.

Висновки.

Розроблений класифікаційний підхід забезпечує систематизований вибір антивібраційних захисних покриттів, значно підвищуючи ефективність процесів проектування та експлуатації вантажних вагонів.

Використання запропонованої класифікації дає змогу істотно скоротити час і матеріальні ресурси на підбір оптимальних покриттів, мінімізуючи метод «спроб і помилок».

Встановлено, що диференціація елементів вантажних вагонів за їхнім функціональним призначенням та умовами експлуатації є основою для точного визначення вимог до антивібраційного захисту.

Обґрунтовано необхідність урахування спектрального складу вібраційних навантажень для вибору покриттів, оскільки це безпосередньо впливає на їхні демпфуючі властивості.

Доведено, що фізико-механічні властивості захисних покриттів (модуль пружності, коефіцієнт втрат, густина) мають бути інтегровані в класифікаційний підхід для об'єктивного оцінювання їхньої ефективності.

Застосування еластомерних покриттів у конструкції візків вантажних вагонів: підвищує надійність і довговічність вагонів, зменшує витрати на обслуговування, покращує безпеку руху, забезпечує адаптацію підвісної системи до сучасних вимог швидкості та навантаження.

Запропонований підхід дає змогу прогнозувати довговічність і надійність елементів вантажних вагонів, оброблених антивібраційними покриттями, в умовах інтенсивних вібраційних навантажень.

Виявлено, що економічна доцільність застосування різних типів покриттів суттєво залежить від їхньої ціни, складності нанесення та очікуваного терміну служби.

Класифікація включає критерії екологічної безпеки та утилізації матеріалів, що є важливим аспектом для сучасного вагонобудування та експлуатації.

Практична апробація підходу на реальних елементах вантажних вагонів підтвердила його високу

точність і адаптивність до різних експлуатаційних умов.

Запропонована методика сприяє уніфікації та стандартизації процесів вибору антивібраційних покриттів у вітчизняній і світовій практиці вагонобудування.

Висновки дослідження можуть бути використані для розроблення галузевих рекомендацій і нормативних документів щодо застосування антивібраційних покриттів на залізничному транспорті.

Імплементація класифікаційного підходу дасть змогу зменшити динамічні навантаження на колії та рухомий склад, подовжуючи термін їхньої експлуатації та знижуючи витрати на ремонт.

Отримані результати відкривають перспективи для розроблення нових поколінь антивібраційних матеріалів із покращеними характеристиками, орієнтованих на конкретні умови експлуатації вантажних вагонів.

Список використаних джерел

1. Chen Y., Wang J., & Zhang L. (2021). *Vibration damping properties of polymer-based composites for freight wagon applications*. *Journal of Sound and Vibration*. 501. 116074. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116074>.
2. Gupta A. & Kumar R. (2020). *Advanced anti-vibration coatings for rail transport: A review*. *Materials Today: Proceedings*. 28(3). 1422–1428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.809>.
3. Ivanov S., Petrov V. & Kozlov A. (2022). *Evaluation of viscoelastic materials for vibration reduction in freight car components*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 102. 103125. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103125>.
4. Lee H. & Kim D. (2023). *Classification of vibration damping materials based on mechanical properties and application to rail vehicles*. *Composite Structures*. 305. 116497. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116497>.
5. Liu B. & Zhang G. (2020). *Design and optimization of multi-layer coatings for vibration isolation in heavy-haul wagons*. *Journal of Vibration and Control*. 26(15-16). 1353–1365. <https://doi.org/10.1177/1077546320911096>.
6. Martínez F. & García E. (2021). *New trends in anti-vibration coatings for railway applications*. *Coatings*. 11(5). 543. <https://doi.org/10.3390/coatings11050543>.
7. Park S. & Jung W. (2022). *A comparative study of rubber-based and polyurethane-based damping materials for freight wagons*. *Materials*. 15(8). 2901. <https://doi.org/10.3390/ma15082901>.
8. Patel R. & Thompson M. (2023). *Finite element analysis of vibration damping in freight wagon components using composite coatings*. *Engineering Structures*. 274. 115182. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115182>.
9. Qin Y. & Zhao X. (2020). *Dynamic performance of freight wagons with different anti-vibration coatings under load variations*. *Vehicle System Dynamics*. 58(6). 923–941. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1623386>.
10. Silva C. & Santos P. (2021). *Experimental assessment of viscoelastic damping materials for railway applications*. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 30(7). 5267–5276. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05799-w>.
11. Smith J. & Brown K. (2022). *A systematic approach to selecting vibration damping materials for rail freight components*. *Construction and Building Materials*. 320. 126291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126291>.
12. Tanaka H. & Watanabe T. (2020). *Development of high-performance damping coatings for heavy transport vehicles*. *International Journal of Rail Transportation*. 8(3). 245–261. <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1708005>.
13. Wang L. & Li X. (2023). *Machine learning-based classification of anti-vibration materials for railway use*. *Smart Materials and Structures*. 32(4). 045015. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acc245>.
14. Yang M. & Chen Z. (2021). *Dynamic behavior of freight wagons with different damping treatments under impact loading*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 235(5). 633–645. <https://doi.org/10.1177/0954409720958941>.
15. Zhang R. & Liu Y. (2022). *Experimental and numerical study on vibration attenuation of freight wagon components using hybrid coatings*. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 10(2). 489–502. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00395-7>.
16. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. *Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock*. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5 (1). P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8.
17. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. *Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock*. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080.
18. Zhao H. & Wei J. (2020). *A review of damping technologies for railway freight vehicles*. *Applied Acoustics*. 166. 107347. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107347>.
19. Zhou P. & Xu D. (2023). *Optimization of composite coatings for vibration reduction in rail freight transport*. *Composite Part B: Engineering*. 248. 110382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110382>.

20. Zhu K. & Li W. (2021). *Performance evaluation of elastomeric coatings for vibration control in heavy-haul wagons*. *Wear*. 476-477. 203654. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203654>.

21. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 2(7). С. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2).

22. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. (2019). *Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry*. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. Vol. 21. № 1. 28-34. <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>.

23. Kumar S. & Sharma N. (2022). *Recent advances in polymer-based damping materials for railway applications*. *Polymer Testing*. 112. 107628. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107628>.

24. Feng X. & Li G. (2023). *A decision-making framework for selecting anti-vibration coatings in rail freight transport*. *Advanced Engineering Materials*. 25(4). 2200985. <https://doi.org/10.1002/adem.202200985>.

CLASSIFICATION APPROACH TO SELECTING ANTI-VIBRATION PROTECTIVE COATINGS FOR FREIGHT CAR COMPONENTS

Dr. Sc. (Tech.) O. V. Fomin, postgraduate student O. S. Kozynka

Abstract. The article presents a classification-based approach to the selection of anti-vibration protective coatings for components of freight wagons. A classification system is proposed that considers key operational factors, types of vibration loads, physical and mechanical properties of coating materials, and the structural specifics of wagon elements. This approach enables optimization of the coating selection process to improve the durability and reliability of railway rolling stock. A systematic analysis of vibration sources occurring during freight wagon operation and their impact on structural components and cargo is conducted. Typical sources of mechanical oscillations are described, and the most highly loaded zones for various types of wagons are identified. Modern polymer-based anti-vibration materials used for structural vibration protection are reviewed. Methods for selecting damping coatings based on cost-effectiveness for components such as the center sill and the body of open-top wagons are proposed. An optimal selection strategy is introduced, taking into account the material of the wagon's structural elements, cargo type, vibration load intensity, and climatic operating conditions. The prospects for using hybrid and multilayer damping systems are highlighted. The study results can be applied in the design,

modernization, and maintenance of freight wagons in accordance with modern vibration protection requirements. Various research methods were employed, including systems analysis for a comprehensive study of vibration issues and current mitigation approaches. A classification approach was used to structure and generalize information on different types of anti-vibration coatings. Experimental methods were applied to assess the performance of coatings under conditions close to real operation. Comparative analysis helped identify optimal solutions among available options, while mathematical modeling techniques may have been used to forecast material behavior. Finally, expert evaluation contributed to formulating recommendations for coating selection.

Keywords: railway transport, transport technologies, freight wagons, maintenance, operation, reliability, load-bearing systems, protective coatings, automation, computer modeling.

Фомін Олексій Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>.

Тел.: +38 (067) 813-97-88. E-mail: fominaleksejvictorovic@gmail.com.

Козинка Олександр Сергійович, аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Київський інститут залізничного транспорту, Національний транспортний університет. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>.

Тел.: +38 (093) 376-13-73. E-mail: kozynka1520mm@gmail.com.

Fomin Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), professor, Dr. Sc. (Tech.), professor, professor of the Department of wagon Cars and Wagon Management, Kyiv Institute of Railway Transport of the National Transport University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>.

Tel.: +38 (067) 813-97-88. E-mail: fominaleksejvictorovic@gmail.com.

Kozynka Oleksandr, postgraduate student of the Department of wagon Cars and Wagon Management, Kyiv Institute of Railway Transport of the National Transport University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>. Tel.: +38 (093) 376-13-73. E-mail: kozynka1520mm@gmail.com.

ГАЙДУК Д. А., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Формування моделі функціонування залізничної транспортної мережі в умовах виникнення відмов і недоступності маршруту

Анотація. Незважаючи на відносно стабільні показники виконання графіка руху поїздів в умовах воєнного стану, тривала війна підвищує ризик впливу людського фактора на організацію перевізного процесу через постійний стрес та емоційні навантаження. Тому розвиток наявних і впровадження нових автоматизованих систем для працівників оперативно-диспетчерської ланки є одним із пріоритетних напрямів досліджень. Завдяки автоматизованим системам зменшується ризик введення помилкових даних через реалізацію контролю коректності інформації, що вносить працівник. Подальша обробка інформації дає змогу використовувати її для формування звітів, аналізів, прогнозів тощо, які є необхідними для ухвалення відповідних управлінських рішень. У статті сформовано модель функціонування залізничної мережі в умовах виникнення відмов і недоступності маршруту прямування поїзда на дільниці. Критерієм вибору оптимального альтернативного маршруту є мінімальний час руху поїзда по дільниці серед множини можливих маршрутів з урахуванням визначеної системи обмежень, поданої у вигляді технічних і технологічних параметрів поїздів та інфраструктури. Топологія дільниці перевезень подана у вигляді теорії графів, а можливість проїзду визначена перевіркою виконання логічних умов, що базовані на параметрах, які характеризують станції, перегони та поїзди. Сформовану модель запропоновано реалізувати як підсистему у складі автоматизованої системи керування перевезеннями АСК ВП УЗ Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень на АРМ працівників оперативно-диспетчерської групи. Це сприятиме зменшенню впливу людського фактора для організації перевезень залізничним транспортом з виникненням відхилень у русі поїздів від нормативного графіка руху, а також підвищенню конкурентоспроможності, надійності та якості надання послуг порівняно з іншими видами транспорту.

Ключові слова: залізничні перевезення, альтернативний маршрут, оптимізаційна математична модель, виконання графіка руху поїздів.

Вступ.

В умовах тривалої повномасштабної війни проти України, коли активні бойові дії охоплюють значну територію нашої держави, для процесу перевезень залізничним транспортом як ніколи характерні невизначеність і ризики. У таких умовах особливо важливим фактором є психоемоційний стан працівників, задіяних у перевізному процесі, особливо оперативно-диспетчерської ланки. Постійний стрес, втома, емоційне навантаження тощо підвищують ризик впливу людського фактора на організацію перевізного процесу, що може призвести до значних економічних наслідків. У зв'язку з цим удосконалення існуючих і створення нових автоматизованих систем керування у вигляді системи підтримки ухвалення рішень є актуальним. Впровадження таких систем сприятиме підвищенню надійності функціонування та конкурентоспроможності залізничного транспорту, зменшивши вплив людського фактора на ухвалення рішень.

Постановка проблеми.

Підвищення надійності функціонування та операційної ефективності залізничної транспортної системи в умовах невизначеності та ризиків.

Аналіз досліджень і публікацій.

У статті [1] розглянуто застосування поняття «живучості» відносно транспортної системи як здатність системи зберігати і відновлювати свою функціональність внаслідок впливу деструктивних процесів. За допомогою визначення значення коефіцієнта живучості системи можна визначити вразливість системи та її здатність до відновлення. Роботу авторів [2] присвячено проблемі побудови надійних маршрутів для здійснення інтермодальних перевезень залізницею та автотранспортом в умовах невизначеності. Запропонована оптимізаційна модель спрямована на забезпечення оптимального маршруту через ділянки автомобільних доріг і залізничних сполучень зі зниженням їхньої пропускної спроможності, а також порушення роботи вузлів і терміналів. У роботі [3] на прикладі високошвидкісної залізниці запропоновано модель оптимізації розкладу руху поїздів через пошук оптимального рішення з мінімальною затримкою поїздів і середнім корегуванням графіка руху за технічних і технологічних обмежень. Запропонований метод дає змогу оптимально використовувати вільний у графіку руху від поїздів час та уникати скасування поїздів.

Мета дослідження.

Формування нової підсистеми АСК ВП УЗ-Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень задля забезпечення живучості залізничної транспортної системи в умовах впливу деструктивних факторів і підтримки якості та надійності її функціонування.

Викладення основного матеріалу дослідження.

На основі попередніх досліджень [4] було встановлено, що показник виконання графіка руху для пасажирських і вантажних поїздів складає 90 та 35 % відповідно. Це свідчить про відносну стабільність організації перевізного процесу в умовах воєнного стану. З відправлення виконання графіка для пасажирських поїздів складає 97 %, а для вантажних – 61 %. До факторів, що можуть вплинути на своєчасне відправлення поїзда зі станції, можна віднести:

- несвоєчасність або порушення порядку і тривалості виконання технічних і технологічних операцій із вагонами або складами поїздів (операції з навантаження або вивантаження вантажів, їх кріплення на рухомому складі, очищення вагона від залишків вантажів; огляд вагонів і складів поїздів у комерційному і технічному відношенні; несвоєчасність оформлення перевізних документів; порушення плану формування поїздів через несвоєчасність прибуття поїзда з проміжної станції, забирання з під'їзної колії, виставлення поїзда на відправну колію);

- виявлення та усунення технічних або комерційних несправностей під час огляду состава; технічна несправність тягового рухомого складу (локомотива, моторвагонного рухомого складу);

- порушення нормальної роботи технічних пристроїв автоматики, телемеханіки, зв'язку, контактної мережі;

- відмова в роботі інформаційних систем, як наслідок впливу на своєчасність автоматизованого формування перевізних документів;

- затримки, пов'язані із виникненням транспортних подій і надзвичайних ситуацій або ліквідацією їхніх наслідків; сторонні втручання в діяльність залізничного транспорту.

Щодо показника прибуття на станцію призначення, то 91 % пасажирських і 49 % вантажних поїздів прибувають за графіком. Причинами несвоєчасного прибуття на кінцеву станцію можуть бути:

- технічна несправність рухомого складу на шляху прямування;

- недотримання перегінного часу, закладеного графіком руху поїздів (обмеження швидкості руху на дільниці, запобігання наїзду);

- вихід із ладу технічних пристроїв на перегоні (відсутність напруги контактної мережі, несправність блокування);

- порушення виконання технологічних операцій (зайнятість колії приймання поїзда іншим

поїздом, ворожість маршрутів, відправлення неперіоритетного поїзда);

- вплив затримки поїзда для відправлення зі станції формування.

Перелік причин не є вичерпним, і, узагальнюючи, можна лише підкреслити різноманітність факторів, які мають вплив на рух поїзда за графіком. Ризик виникнення причин обумовлений від моменту підготовки состава поїзда до перевезень і до прибуття на станцію призначення. Джерелом можуть бути як відхилення з технічних причин, так і вплив людського фактора. Відхилення від графіка руху поїздів для підприємства спричиняє не лише операційні та репутаційні ризики, але й фінансові. З метою їх мінімізації виникає необхідність побудови оптимального варіанта пропускання поїздів на дільниці.

Побудова моделі потребує отримання значної кількості інформації, яка буде виступати вихідними даними. Першоджерелом інформації на полігоні перевезень може бути інформація, яка вже внесена до єдиної автоматизованої системи керування перевезеннями АСК ВП УЗ-Є за допомогою профільних автоматизованих робочих місць (АРМ) працівників підрозділів залізниць. Наприклад, завдяки АРМ товарного касира (або агента комерційного) сформована інформація про вантаж, завантажений у вагон, а в АРМ СТ Д здійснюється формування складів поїздів, вносять інформацію про здійснення технологічних операцій із поїздами, приймання-здавання змін локомотивних бригад, рух поїздів тощо. АСУ ЕРПВ відображає інформацію про стан вагонного парку, а через АРМ АС ВВП вносять інформацію про наявність попереджень на дільниці, що потребує особливої пильності під час руху. Уся інформація від систем у подальшому зводиться до АСК ВП УЗ-Є.

Вторинним джерелом інформації на полігоні може бути система «Надзвичайна ситуація» (АС «НС»). На підставі інформації, що внесена в систему, можна визначити обмеження в русі поїздів за визначеним напрямком залізничних перевезень.

На підставі інформації з цих джерел необхідно визначити параметри, що будуть впливати на розв'язання задачі і характеризувати станції, перегони та поїзди на полігоні.

Інформацію про поїзди, що знаходяться в межах полігону, подамо як множину T_i з визначеними параметрами

$$T_i = (N_i, R_i, E_i, TS_i, L_i, V_{\max_i}), \quad (1)$$

де N_i – номер поїзда;

R_i – пріоритет поїзда, $R \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, де 1 –

швидкісний або позачерговий, 2 – пасажирський, 3 – приміський, 4 – вантажний, 5 – інший (дрезини, локомотиви тощо);

E_i – род струму тягового рухомого складу,

$E \in \{0,1,2,3\}$, де 0 – відсутній, 1 – постійний, 2 – змінний, 3 – змішаний;

TS_i – технічний стан поїзда, $TS_i \in \{0,1,2\}$, де

0 – справний; 1 – несправний, рух можливий з обмеженнями; 2 – несправний, рух неможливий;

$V_{\max i}$ – максимально допустима швидкість руху

поїзда, км/год;

L_i – довжина поїзда, м.

Наведені параметри характеризують кожен поїзд:

– за номером поїзда визначають його належність до категорії (пасажирський, вантажний тощо) і пріоритет пропускання;

– род струму дає змогу визначити можливість руху електропоїзда по дільниці;

– технічний стан поїзда впливає на швидкість руху поїзда (у разі виникнення несправності поїзд рухається зі зменшеною швидкістю) і можливість продовжувати рух;

– довжина поїзда є визначальною для вибору колії приймання поїзда на станцію.

Полігон залізничних перевезень доцільно подати як граф. Уявимо абстрагований напрямок між станціями S_1 та S_7 , як показано на рисунку.

Перегони між станціями двоколіїні, окрім перегону S_5 та S_6 , який є одноколіїним.

$a_{ij} = 1$, якщо зв'язок вершини S_i з

вершиною S_j існує,

$a_{ij} = 0$, якщо зв'язку не існує.

Матриця суміжності графу G наведена в таблиці.

Матриця суміжності A графа G

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
S_1	0	1	0	0	0	0	0
S_2	1	0	1	0	0	0	0
S_3	0	1	0	1	0	0	0
S_4	0	0	1	0	1	0	0
S_5	0	0	0	1	0	1	0
S_6	0	0	0	0	1	0	1
S_7	0	0	0	0	0	1	0

Перегін подано як кортеж

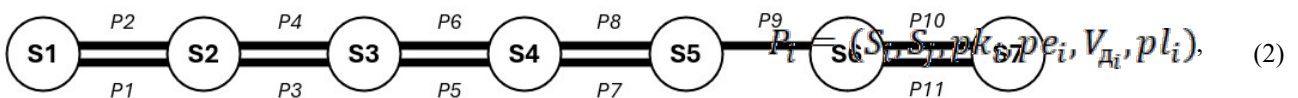


Рис. 1. Граф напрямку залізничних перевезень $S_1 - S_7$

S_7

Топологія напрямку подана як граф $G = (S, P)$, де S – множина вершин (станцій), P – множина ребер (перегонів).

Наявність зв'язку вершин графів визначена матрицею суміжності $A = [a_{ij}]$, де

де S_i – номер початкової вершини (станції);

S_j – номер кінцевої вершини (станції);

pk_i – кількість колій перегону, $pk_i \in \mathbb{N}$;

pe_i – наявність електрифікації;

$V_{дi}$ – дільнична швидкість, км/год;

pl_i – довжина перегону, км.

Множина перегонів P_i сформована на основі

матриці суміжності A за умови, коли $a_{ij} = 1$.

Параметр $pk_i \in \mathbb{N}$ описує кількість колій на перегоні та є основним для визначення можливості проїзду. Якщо кількість колій $pk_i > 1$, то виникає необхідність перевірки стану кожної з них. Нехай множина колій перегону визначена як $pm_n = \{pk_{i_n}\}, n = \overline{1, pk_i}$, тоді вільність колії визначена як бінарна змінна $pz_{pm} \in \{0, 1\}$, де 0 – колія перегону вільна, 1 – колія зайнята.

Зазвичай із автоблокуванням кожен перегін поділений на блок-ділянки, що допускає знаходження на перегоні декількох поїздів. Тому зайнятість перегону буде визначена виходячи з таких умов:

- чи відбулося руйнування колії перегону, що унеможливує рух поїзда;
- чи на колії перегону зупинився поїзд, який не може продовжувати подальший рух через несправність, або сталося сходження рухомого складу;
- чи закрита колія перегону для проведення технологічного вікна.

Тобто основним фактором для визначення вільності перегону є можливість поїзда продовжувати подальший рух. Інакше перегін вважають зайнятим, і рух може бути здійснений лише іншою вільною колією (за наявності).

Множину станцій подано як $S_i = (sk_i)$, де

sk_i – кількість приймально-відправних колій станції, $sk_i \in \mathbb{N}$.

Для спрощення в цьому випадку не враховано повний колійний розвиток станцій, а лише кількість приймально-відправних колій, які передбачають можливість наскрізного пропускання поїздів. При цьому визначення доступності станції є досить складним, оскільки для кожної станційної колії sk_i

необхідно перевіряти одразу декілька умов: вільність, електрифікацію, довжину, стан відмов пристроїв.

Вільність кожної колії $sm_n = \{sk_{i_n}\}, n = \overline{1, sk_i}$ визначають як

бінарну змінну $sz_{sm} \in \{0, 1\}$, де 0 – колія вільна, 1 – колія зайнята. Наявність електрифікації колії для множини sm_n визначають як значення змінної

$se_{sm} \in \{0, 1, 2\}$, де 0 – електрифікація відсутня, 1

– постійний струм, 2 – змінний струм. Довжину колії $sl_{sm} \in \mathbb{N}$ визначають у метрах. На швидкість проходження поїзда по станційній колії впливає стан відмов технічних пристроїв $sv_m \in \{0, 1\}$, де 0 – працюють, 1 – несправні.

Якщо на дільниці може рухатися електровоз змішаного струму ($E_i = 3$), який може прямувати на електрифікованих лініях як постійного, так і змінного струму, тоді необхідно прийняти

$$E_i = 3 \Rightarrow pe_i \in \{1, 2\} \wedge se_{sm} \in \{1, 2\} \quad (3)$$

Прибуття поїзда на станцію є можливим, якщо хоча б одна колія станції вільна, електрифікація відповідає типу тягової одиниці, довжина колії більша довжини поїзда, тобто для опису цього процесу доцільно використати елементи теорії логіки:

$$\exists sm_n \in S_i, sz_{sm} = 0 \wedge se_{sm} = E_i \wedge sl_{sm} > L_i. \quad (4)$$

Проїзд правильною колією перегону можливий, якщо хоча б одна колія вільна, а електрифікація відповідає роду струму тягової одиниці:

$$\exists pm_n \in P_i, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = . \quad (5)$$

Для визначення можливості проїзду неправильною колією перегону додатково перевіряють можливість проїзду на наступному за напрямком руху перегоні (де $\pm$ залежно від напрямку

руху, «+» якщо від S_i до S_{i+1} , «-» якщо від S_i до S_{i-1}), а також можливість приймання на колії наступної станції:

$$\begin{aligned} & (\exists pm_n \in P_i, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = E_i) \wedge (\exists pm_n \in P_{i\pm 1}, pz_{pm} = 0 \wedge pe_i = E_i) \\ & \wedge (\exists sm_n \in S_{i\pm 1}, sz_{sm} = 0 \wedge se_{sm} = E_i \wedge sl_{sm} > L_i). \end{aligned} \quad (6)$$

Нехай маршрут прямування поїзда визначено як впорядковану послідовність вершин і ребер графа згідно з положеннями теорії графів, тоді подамо його як

$$M_N = (S_n P_n, S_{n\pm 1} P_{n\pm 1}, \dots, P_{n\pm k}, S_{n\pm k}), M_N^{\text{норм}} \in M_N, \quad (7)$$

де S_n, P_n – порядковий номер станції та перегону початку маршруту;

$P_{n\pm k}, S_{n\pm k}$ – порядковий номер станції та перегону кінця маршруту залежно від напрямку руху;

$M_N^{\text{норм}}$ – встановлений графіком руху поїздів маршрут поїзда;

k – кількість станцій і перегонів у маршруті.

Якщо після перевірки виконання умов (4)-(6) рух поїзда встановленим маршрутом неможливий, тоді визначають альтернативний маршрут серед множини можливих.

Нормативну тривалість виконання технологічних операцій із поїздом на станції за маршрутом визначають за формулою

$$MtS_N = \sum_i^k t_{s_i}, \text{ хв} \quad (8)$$

де t_{s_i} – тривалість операцій із поїздом на станції i , хв.

Під технологічними операціями з поїздом на станції слід розуміти загальну тривалість знаходження поїзда на i -й станції: від моменту прибуття з урахуванням простою для посадки та висадки пасажирів, зміни локомотива або локомотивної бригади, причеплення та відчеплення групи вагонів, огляду в комерційному і технічному відношенні тощо і до відправлення зі станції.

Фактична тривалість операцій на станції з прямуюванням альтернативним маршрутом відрізняється від нормативної як різниця часу на їх виконання

$$\Delta MtS = MtS_N^{\text{факт}} - MtS_N^{\text{норм}}, \text{ х} \quad (9)$$

Аналогічно тривалість прямуювання поїзда перегонами за маршрутом і альтернативним маршрутом по перегону та різницю між фактичним і нормативним часом визначають за формулами

$$MtP_N = \sum_i^k t_{p_i}, \text{ хв}, \quad (10)$$

$$\Delta MtP = MtP_N^{\text{факт}} - MtP_N^{\text{норм}}, \quad (11)$$

де t_{p_i} – тривалість прямуювання поїзда по перегону i , хв.

Загальний час руху поїзда по дільниці графіковим маршрутом визначають як

$$Mt_N = MtS + MtP, \text{ хв}, \quad (12)$$

тоді різницю часу руху альтернативним маршрутом порівняно з графіком визначають за формулою

$$\Delta Mt_N = \Delta MtS + \Delta MtP, \text{ хв}. \quad (13)$$

За критерій вибору оптимального альтернативного маршруту на множині можливих приймають із відповідною системою обмежень

$$\Delta Mt_N(\forall M_N) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} V_{\text{макс}} > V_d \\ N \leq N_{\text{наявн}} \\ G \leq G_{\text{макс}} \end{cases}, \quad (14)$$

де $\forall M_N$ – множина всіх можливих маршрутів;

N – пропускна спроможність дільниці;

G – вага поїзда, т.

Висновки.

Для підвищення надійності та забезпечення якості функціонування залізничної транспортної системи в умовах невизначеності, спричиненими впливом внутрішніх і зовнішніх факторів, у роботі сформовано оптимізаційну модель вибору оптимального альтернативного маршруту за критерієм мінімальної різниці часу руху поїзда по дільниці порівняно з графіковим маршрутом. Необхідність пошуку альтернативного маршруту руху поїзда обумовлена виникненням як позаштатних ситуацій (руйнування колії, зупинка поїзда на перегоні через несправність рухомого складу та ін.) так і планових робіт (технологічні вікна тощо), які унеможливають подальший рух поїзда встановленим маршрутом. При цьому можливість проходження поїздом кожної ділянки маршруту перевіряють за сукупністю логічних умов, які базовані на характеристиках станцій, перегонів і поїздів. Система обмежень урахує технічні і

технологічні характеристики поїздів та інфраструктури. Інтеграція запропонованого рішення до системи АСК ВП УЗ Є у вигляді системи підтримки ухвалення рішень дає змогу працівникам оперативно-диспетчерської групи краще планувати рух поїздів по дільниці в разі виникнення відхилень від графіка руху.

Список використаних джерел

1. Красноштан О. М. Живучість транспортної системи та способи її підвищення. *Автомобіліст України*. 2023. С. 42–47. URL: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-2-274-42-47>.
2. Uddin M., Huynh N. Reliable Routing of Road-Rail Intermodal Freight under Uncertainty. *Networks and Spatial Economics*. 2019. Т. 19, № 3. С. 929–952. URL: <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9438-6>.
3. Propagation-Based Train Rescheduling under Recoverable Delay Disturbances / J. Zhang та ін. *Journal of Advanced Transportation*. 2024. Т. 2024. С. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1155/2024/9961840>.
4. Гайдук Д. А., Бутко Т. В. Аналіз впливу воєнного стану на виконання графіку руху поїздів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. (6-7 червня 2024 р. м. Харків)*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 49-50.

Гайдук Дмитро Андрійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: d.haiduk@ukr.net. ID ORCID 0000-0002-7816-2216.

Haiduk D. A. Development of a Model for the Functioning of the Railway Transport Network under Route Failures and Unavailability Conditions

Abstract. Despite the relatively stable indicators of train schedule performance under martial law conditions, the ongoing war increases the risk of human factor influence on the organization of the transportation process due to continuous stress and emotional strain. Therefore, the development of existing and the implementation of new automated systems for operational and dispatch personnel is one of the priority areas of research. Automated systems reduce the risk of erroneous data entry by implementing input validation and correctness control mechanisms. Further processing of this information enables its use in generating reports, analyses, forecasts, and other outputs necessary for informed managerial decision-making.

This study presents a model of the railway

network's functioning under conditions of failures and unavailability route within a given section. The criterion for selecting the optimal alternative route is the minimum train travel time within the section, chosen from a set of possible routes, taking into account a defined system of constraints represented by the technical and technological parameters of trains and infrastructure. The topology of the transportation section is modeled using graph theory, while route feasibility is determined by verifying logical conditions based on parameters that characterize stations, track sections, and trains.

It is proposed to implement the formed model as a subsystem within the Automated Transportation Control System (ASK VP UZ E), functioning as a decision support system on the workstations of operational-dispatch personnel. This will help reduce the impact of the human factor in railway transportation management during disruptions to the scheduled train movements and will improve the competitiveness, reliability, and quality of rail transport services compared to other modes of transportation.

Keywords: railway transportation, alternative route, optimization mathematical model, train schedule performance.

Haiduk Dmytro Andriyovych, PhD student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: d.haiduk@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-7816-2216>.

УДК 656.2: 621.3: 614.8

DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.336437

КУСТОВ В. Ф., доцент,

ПРИЛИПКО А. А., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики

Анотація. У статті досліджено вплив підвищеної вологості на деградацію елементів захисту від електромагнітних завад і зміну електричних параметрів каналів проникнення завад у системах залізничної автоматики. Встановлено, що за умов високої вологості змінюються електричні характеристики частотних фільтрів, часових селекторів, захисних конденсаторів, обмежувачів напруги та оптронів, що призводить до зниження ефективності захисту від імпульсних і високочастотних завад. Показано, що волога суттєво підвищує паразитну ємність елементів гальванічної розв'язки між провідниками, а також між провідниками та корпусом і водночас знижує електричний опір ізоляційних матеріалів. Ці зміни сприяють посиленню перенесення імпульсних і високочастотних завад у критичні електронні вузли. Встановлено, що навіть за наявності справних захисних елементів рівень проникнення завад може перевищувати допустимі межі через вплив навколишнього середовища. Це становить потенційну загрозу для електромагнітної сумісності (ЕМС) і функціональної безпеки (SIL) систем керування рухом поїздів, особливо у випадках одночасного впливу вологи на всі канали резервування, що може спричинити кратні небезпечні відмови та призвести до аварій або навіть катастроф на залізничному транспорті.

Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення стандартів випробувань пристроїв залізничної автоматики з урахуванням кліматичних чинників і впливу міжпровідникових ємнісних каналів.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробників, аудиторів і органів сертифікації електричних, електронних і програмованих електронних систем керування та контролю, що експлуатовані в умовах підвищених вимог до функціональної безпеки та електромагнітної сумісності.

Ключові слова: вологість, електричні/електронні/програмовані електронні системи керування, електромагнітна сумісність, електромагнітні завади, завадостійкість, небезпечні відмови, рівні SIL, системи залізничної автоматики, функційна безпека.

Вступ

Забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) і функціональної безпеки (SIL) у системах залізничної автоматики потребує не лише якісних елементів захисту від завад, а і контролю над фізичними параметрами каналів проникнення завад. У той час як чинні випробування проводять за стандартними кліматичними умовами (температура 23 ± 2 °C, відносна вологість (RH) 45–55 %), реальні умови експлуатації – підвищена вологість, коливання температур, утворення конденсату – можуть значно впливати на ефективність як завадозахисту, так і всієї системи.

Елементи захисту від завад часто працюють у зоні підвищеної вологості, що властиво об'єктам залізничної інфраструктури, розташованим на

© КУСТОВ В. Ф., ПРИЛИПКО А. А., 2025

відкритому повітрі або в недостатньо вентильованих приміщеннях. У цих реальних умовах змінюються електричні параметри елементів захисту від завад (частотних і часових селекторів, феритових фільтрів, оптронів, імпульсних обмежувачів напруги), що призводить до суттєвого зменшення ефективності захисту від завад. Водночас змінюється структура проникнення завад: зростає паразитна ємність між електричними колами, між провідниками та заземленими частинами, елементами гальванічної розв'язки (входами-виходами оптронів, обмотками трансформаторів), знижується пробивна напруга ізоляції. Ігнорування цього чинника призводить до того, що сертифікована продукція за чинними стандартами може незадовільно і небезпечно функціонувати в реальних умовах експлуатації та спричиняти порушення безпеки руху і затримки поїздів.

У статті подано аналітичні моделі, теоретичне та практичне обґрунтування впливу вологості на пристрої і системи залізничної автоматики.

На жаль, чинні стандарти випробувань (ДСТУ EN 50121-х, EN 50121-х, IEC 61000-4-х) передбачають ЕМС-випробування в лабораторних умовах без урахування кліматичних чинників, у тому числі вологості. Це створює ризик, що деградація захисних елементів через дію вологи залишиться поза увагою інженерів і сертифікаційних органів. Мета цієї роботи – дослідити механізми деградації елементів заводозахисту в умовах підвищеної вологості та оцінити її наслідки для ЕМС і SIL залізничних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Базові вимоги щодо стійкості електронного обладнання до електромагнітних завад надано в серіях стандартів Міжнародної електротехнічної комісії IEC 61000-4-х, стандартах CENELEC (Європейського комітету зі стандартизації в електротехніці) серії EN 61000-4-х. Основними в залізничній галузі для електронного та електричного обладнання є стандарти серії ДСТУ EN 50121-х (електромагнітна сумісність залізничних застосувань) і ДСТУ EN 50155 (електронне обладнання на рухомому складі) [1-3]. Вимоги щодо функціональної безпеки наведено у стандартах CENELEC EN 50126, EN 50128, EN 50129. Практично всі ці стандарти гармонізовані і чинні в Україні. У чинному стандарті ДСТУ 4178 із функціональної безпеки і надійності та галузевому нормативному документі «Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів» [4] також надані вимоги щодо доведення функціональної безпеки в разі дії електромагнітних завад. Але у всіх цих нормативних документах не нормовані одночасні впливи електромагнітних завад і підвищеної (реальної) вологості на місцях експлуатації пристроїв і систем, хоча окремі однофакторні випробування обладнання на стійкість до зміни вологості є у всіх міжнародних і національних стандартах, що підкреслює реальний вплив цих чинників.

У роботі [5] проаналізовано та класифіковано електромагнітні завади, що можуть негативно впливати на функціонування залізничної автоматики. Автори пропонують підходи для зниження впливу таких завад. У статті [6] розглянуто питання забезпечення ЕМС між тяговим електропостачанням і пристроями залізничної автоматики. Автори аналізують джерела електромагнітних завад і пропонують методи їх зниження, але також без урахування чинників вологості. Робота [7] присвячена впливу завад від тягової мережі на рейкові кола. Хоча основну увагу приділено електромагнітним завадам, зазначено, що кліматичні чинники, такі як вологість,

можуть впливати на надійність вимірювань і функціонування систем. У всіх публікаціях надано інформацію про важливість урахування впливів електромагнітних завад на готовність і безпечність функціонування систем залізничної автоматики.

Мета та завдання дослідження

В умовах підвищеної вологості виконує свої функції велика кількість пристроїв залізничної автоматики (за винятком класів K1, K1.1, згідно з нормативним документом галузі [8]), при цьому всі канали резервування можуть зазнавати одночасного впливу завад і кратних небезпечних відмов, що звести нанівець може виграш від використання багатоканальних структур з основним типом резервування – навантажувальним резервуванням. Тому дослідження впливу вологості на параметри електромагнітної сумісності і функціональної безпеки є необхідним і важливим завданням.

Більшість сучасних стандартів ЕМС (наприклад IEC 61000-4-х, EN 50121-4) створені для уніфікованих тестів і розроблені як мінімальні вимоги щодо захисту від завад. Немає однозначної методики тестувань «завада + вологість», що усталена для сертифікації. Обладнання може пройти окремий тест на вологість, ЕМС-тест за стандартом за температури 25 °C, 45 % RH (вологості), але вийти з ладу в тунелі метрополітена чи залізниці за вологості 95 % RH під дією наносекундних або мікросекундних завад. Можливий наслідок: формальна відповідність — без убезпечення.

Стандарти не враховують багатофакторні впливи можливих змін температури та вологості на рівень стійкості до небезпечного впливу завад, вони обмежені лише тимчасовими окремими впливами, а не станом комплексної дії різних чинників і реальних змін від них елементів заводозахисних пристроїв і параметрів тракту проникнення завад до дуже чутливих мікроелектронних елементів. Важливою відмінністю мікроелектронних елементів від реле першого класу надійності є те, що від завад може бути спотворена будь-яка відповідальна інформація для систем керування рухом поїздів, а внаслідок теплового пробою через дію потужних імпульсних завад можуть виникати небезпечні відмови. Порушення функціональної безпеки внаслідок впливу завад є загрозою для життя людей, довкілля і великим матеріальним збитком.

З метою аналізу діапазону впливу цих чинників необхідно провести теоретичні і практичні дослідження основних елементів захисту від завад із позиції можливої зміни їхньої якості під дією вологості, а також змін чутливості до небезпечних завад і функційної безпечності пристроїв залізничної автоматики в разі комбінованого впливу

«завада+вологість» порівняно з чинними стандартами і нормами [1-4], у яких окремо враховано тільки параметри завад або вологості.

так і недопустимого випромінювання. Тому важливим є аналіз можливих змін основних параметрів способів захисту і завадозахисних елементів у процесі експлуатації під дією вологості.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Дослідження впливу вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад

Для захисту від зовнішніх і внутрішніх електромагнітних завад застосовують такі основні способи та елементи:

- просторове та гальванічне розділення чутливих кіл і компонентів від джерел завад (ліній живлення, силових комутаційних кіл тощо), що сприяє зменшенню електричного зв'язку і, зокрема, паразитної ємності між елементами;

- обмеження напруги, струму і потужності завад;
- екранування і заземлення;
- використання частотної і часової селекції робочих сигналів і завад;
- зменшення пульсацій вторинного живлення постійного струму.

Для цього використовують найчастіше такі елементи і можливості:

- зменшення паразитної ємності між електричними колами, якими розповсюджуються електромагнітні завади, і чутливими до завад колами і елементами, а також між корпусом (екраном) і проводами;

- трансформатори – для гальванічного розділення і збільшення опору для проникнення електромагнітних завад, особливо на високих частотах;

- індуктивні дроселі, феритові елементи (кільця, трубки/циліндри, кліпси, SMD-ферити) – для електричних фільтрів;

- конденсатори – для електричних фільтрів, часових селекторів, зменшення пульсацій вторинного живлення;

- оптрони – для гальванічного розділення і збільшення опору для завад, особливо на високих частотах;

- розрядники, варистори, TVS-діоди (супресори) – для обмеження рівней напруги від потужних імпульсних завад.

Одним із важливих чинників, які можуть впливати на функційну безпечність за одночасних впливів на всі канали резервування та виключити основну перевагу резервованих систем – незалежність відмов у них, є вплив вологості на якість завадозахисних елементів і опір тракту розповсюдження завад як у бік чутливих елементів,

1.1. Зміна паразитної ємності між колами, що є джерелами або шляхами поширення електромагнітних завад, і чутливими до завад колами й елементами системи

До основних чинників впливу зовнішніх завад належать паразитні ємності, якими електромагнітні завади проникають до дуже чутливих мікроелектронних елементів, енергія спрацьовування і теплового пробою яких внаслідок високої швидкодії в мільярди разів менша, ніж у традиційних базових елементів залізничної автоматики – електромагнітних реле першого класу надійності. Важливою відмінністю мікроелектронних елементів від цих реле є те, що від завад може бути спотворена будь-яка відповідальна інформація для систем керування рухом поїздів, а внаслідок дії потужних імпульсних завад і теплового пробою можуть виникати небезпечні відмови не тільки в окремих, а й одночасно в кількох каналах резервування (у слабких за чутливістю до завад ланках).

1.1.1. Паразитна ємність між проводами в джгутах і проводами і корпусом (екраном)

Паразитна ємність між проводами в джгутах утворюється через наявність електричного поля між ними. Вона визначена:

- відстанню між жилами;
- діелектричною сталою матеріалу між ними (ізоляція + повітря + можлива волога);
- геометрією жил та укладання джгута.

Паразитна ємність між проводами сильно залежить від температури, вологості та навіть щільності і структури самого джгута.

За рахунок підвищення температури:

- **знижується** діелектрична стала ізоляції (наприклад ПВХ), відповідно ємність **зменшується на 5–10 %**;

- в'язкість ізоляції зменшується, жили зсуваються ближче – ємність **може трохи зрости** з деформацією;

- опір ізоляції знижується – зростає **витік** струму, але не сама ємність.

За температури 60–90 °C паразитна ємність зазвичай змінюється до $\pm 10\%$ у стабільних умовах. Важливо, що механічна зміна форми джгута з нагріванням також може вплинути.

За рахунок підвищення вологості:

- поглинання води ізоляцією (ПВХ, гума) – збільшується ϵ (діелектрична стала);

- поява води між жилами (конденсат) – значне зростання ємності;

- опір ізоляції падає – зростає ризик пробую;

- відносна вологість $> 90\%$, особливо якщо є конденсація, – паразитна ємність може зрости суттєво.

Паразитна ємність між проводами і корпусом (екраном) зростає зі збільшенням вологості повітря. Це зумовлено такими фізичними чинниками:

1. Вода — це полярний діелектрик, і пара води в повітрі збільшує діелектричну проникність середовища між провідником і екраном:

- у сухому повітрі $\epsilon \approx 1.0006$;

- вологому ϵ може не сильно зростати до 1.01–1.03;

- через **конденсацію вологи** на ізоляції чи екрані ϵ може наближатися до 10–80 (як у воді), тобто збільшуватися в десятки разів.

2. За вологості більше 85 % і температурі, близької до точки роси, може відбутися конденсація на внутрішньому боці екрана або ізоляції. Це різко збільшує паразитну ємність і може викликати непередбачувані відмови або збої.

У стандартах EN 50155 та IEC 60068-2 рекомендовано комбіновані випробування з температурою та вологістю, але без комбінації з електромагнітними завадами.

Зміну паразитної ємності для стандартних проводів залізничної автоматики перерізом **0,75 мм²** (діаметр $\approx 0,98$ мм, ізоляція: 0,5 мм) від вологості наведено в табл. 1.

Зміна паразитної ємності стандартних проводів залізничної автоматики перерізом 0,75 мм²

Умова	Діелектрична проникність ϵ	Ємність між проводом і корпусом, пФ/м	Ємність між двома проводами у джгуті, пФ/м
Сухе повітря 20 °C	~ 1.0006	79	21
Повітря за температури 85 °C	~ 1.005	79,35	21,1
Вологе повітря (100 %)	~ 1.01	79,7	21,2
Вологий шар	~ 5	396	105
Сильний конденсат	~ 80	6328	1675

Отже, паразитна ємність між проводами і корпусом (екраном) пристроїв у реальних умовах може збільшитися у 5-80 разів (до 8000 %).

Залежить від температури і вологості через зміну діелектричних властивостей ізоляційного матеріалу.

1.1.2. Паразитна (міжпровідна або міжжилна) ємність кабелів

Зростання температури призводить до зменшення діелектричної сталої ϵ у більшості полімерних ізоляцій, наприклад полівінілхлориду (ПВХ), поліетилену (ПЕ), які часто використовують для кабелів СЦБ, зростання тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$, що погіршує ЕМС,

збільшення витоків струму між жилами за високих температур.

Зростання вологості призводить до зростання діелектричної сталої ϵ в ізоляційних матеріалах (через поглинання води), внаслідок чого паразитна ємність зростає. Також підвищується ризик пробою ізоляції або зменшення опору між жилами. Особливо це критично:

- для ПВХ і гумових оболонок кабелю, які схильні до гігроскопії, і паперової ізоляції між жилами кабелю (кабелі з паперовою ізоляцією в нових проєктах не використовують, але є ще на застарілих ділянках або депо ($< 10\%$);
- екранованих і сигнальних кабелів, де ємність критична для передавання сигналу.

Типова паразитна ємність для сигнально-блокувальних кабелів становить 50–100 пФ/м. З підвищенням вологості до 90 % ємність може збільшитися більш ніж на 70 %. У табл. 2 оцінено збільшення паразитної ємності кабелів з підвищенням вологості до 90 %.

Оцінювання збільшення паразитної ємності кабелів СЦБ за вологості 90 %

Тип кабелю	Ємність у сухому стані	Ємність за вологості 90 %	Збільшення
МСЦБ-ПЕ (поліетилен)	~50 пФ/м	~55–60 пФ/м	~10–20 % (незначно, ПЕ мало вбирає воду)
СБПВ (ПВХ)	~70 пФ/м	~100–120 пФ/м	до 70 % зростання
МСЦБ-ППМ (папір)	~100 пФ/м	~180–250 пФ/м	в 1,8–2,5 раза більше
Пошкоджений кабель із конденсатом	-	до 500–1000 пФ/м локально	критичне зростання

Розуміння впливу температури та вологості на паразитну ємність є критично важливим для забезпечення надійної роботи систем залізничної автоматики. Урахування цих чинників для проєктування та експлуатації кабельних систем допоможе мінімізувати ризики та забезпечити стабільну роботу обладнання.

Збільшення паразитної ємності між жилами кабелю внаслідок води до 90 % може досягати до 70 % (паперових до 250 %), а у випадках пошкодження кабелю і конденсату – у 10 – 20 разів.

1.1.3. Паразитна ємність трансформаторів

Паразитна (міжобмоткова, обмотка-корпус, обмотка-магнітопровід тощо) ємність трансформатора має суттєвий вплив на електромагнітну сумісність (ЕМС) електронних систем, особливо в умовах імпульсних і високочастотних режимів роботи. Вона створює шляхи для проходження завад між первинною та вторинною обмотками трансформатора, а також, у разі заземлення магнітопроводу, між портом заземлення і вторинною обмоткою, в обхід пристроїв захисту від завад. Це призводить:

- до передавання завад із мережі живлення в низьковольтну частину (наприклад до процесора, АЦП, елементів логіки і пам'яті);
- збільшення рівня радіочастотних завад у сигнальних лініях;
- порушення норм ЕМС, зокрема вимог із випромінювання і стійкості до завад.

Основні чинники, що впливають на паразитну ємність трансформатора:

- відстань між обмотками (менша відстань – більша ємність);
- площа перекриття обмоток (більша площа перекриття – більша ємність);
- тип ізоляції (товщина, матеріал) – тонша ізоляція або вища діелектрична проникність – більша ємність;
- намотування (шарове, секційне) – шарове намотування збільшує площу перекриття – збільшує ємність;
- наявність екранів між обмотками – може зменшити міжобмоткову ємність, але збільшує ємність до екрана;
- матеріал магнітопроводу – малий опір для високочастотних завад дає змогу проходити заваді через паразитну ємність із первинної обмотки на магнітопровід і далі через паразитну ємність – на вторинну обмотку трансформатора. Деякі матеріали магнітопроводів трансформаторів чи дроселів мають

виражену залежність від частоти і зменшують суттєво загальний опір проходження завад через трансформатори. Так, повний опір марганцево-цинкового феритового магнітопроводу зі збільшенням частоти пропорційно зменшується, і навпаки, опір нікель-цинкового феритового магнітопроводу практично є незмінним [9]. Вплив температури та вологості на питомий опір MnZn феритів є суттєвим. У крайніх випадках опір може зменшитися в 1000–10 000 разів;

- старіння матеріалів призводить до зміни властивостей ізоляції та зміни ємності;
- температура – зміна діелектричної проникності діелектрика призводить до незначної зміни паразитної ємності ($\sim \pm 1 \dots 5$ % на 50 °C для органічних матеріалів).

Волога також суттєво впливає на характеристики трансформатора як елемента захисту від електромагнітних завад і гальванічного розділення електричних кіл – збільшує діелектричну проникність діелектриків, тому зростає паразитна ємність.

Шляхи проникнення вологи в трансформатор:

- через герметичні порушення або ущільнення;

Наслідки впливу вологості на ефективність трансформатора як елемента захисту від завад

Вплив	Наслідки
Збільшення паразитної ємності	Зменшення опору для проникнення завад, особливо на високих частотах. Виникнення небажаних витоків струму
Зменшення опору ізоляції	Виникнення витоків струму, пробойів, у тому числі від потужних імпульсних завад і розрядів статичної електрики
Зниження електричної міцності масла	Масло перестає ізолювати – міжвиткові пробойи
Випаровування вологи з навантаженням	Утворення газів, мікропухирців – дугові розряди
Корозія та окиснення металів	Прискорене старіння внутрішніх частин
Зменшення терміну служби	Вологість навіть 2 % у паперовій ізоляції скорочує ресурс у чотири-п'ять разів

Паразитні ємності в силових трансформаторах

Тип паразитної ємності	Що зв'язує	Типова величина
Між обмотками (первинна -вторинна)	Високовольтна – низьковольтна обмотка	50...1000 пФ
Обмотка – магнітопровід (земля)	Первинна або вторинна – корпус	500...5000 пФ
Між витками однієї обмотки	Сусідні витки одного шару	1...10 пФ/виток
Між шарами намотки	Обмотка в багатшаровій конфігурації	20...500 пФ

Т
а

Паразитна ємність трансформатора залежить від діелектричних властивостей середовища між провідниками, а ці властивості змінюються під впливом вологості, тобто паразитна ємність суттєво зростає разом із діелектричною проникненістю ϵ_r матеріалів трансформатора внаслідок підвищення вологості.

Типові значення діелектричної проникненості ϵ_r для умов залізниці наведено в табл. 5.

Значення діелектричної проникненості ϵ_r для умов залізниці

Матеріал або умова	ϵ_r
Сухе повітря	1.0
Волога ізоляція (карболіт, текстоліт)	4–8
Конденсат без забруднення	~20
Сильний конденсат (вода з домішками – електроліт)	40–80
Тонка волога плівка з графітовими частинками	60–150
Волога лакова ізоляція з тріщинами	30–50

Паразитні ємності силових трансформаторів збільшуються внаслідок вологості:

- 60–75 % на 10–30 %;
- 90–100 % (без конденсату) на 50–100 %;
- 90–100 % з конденсатом на 200–1000 % (2–10 разів), особливо у відкритих або недостатньо захищених конструкціях, типових для залізничної автоматики.

Зволоження пористої ізоляції дає тривке зростання ємності на 300–600 %. Ще більше впливає волога на паразитну ємність в умовах соляного туману, біля моря, депо з реагентами. Також суттєво впливає волога в поєднанні з сажею та гальмівним пилом (графітом), який утворюється в результаті зносу гальмівних колодок і контактних елементів (ковзунів, щіток) на залізничному транспорті та метрополітені.

Зволоження пористої ізоляції дає тривке зростання ємності на 300–600 %. Ще більше впливає волога на паразитну ємність в умовах соляного туману, біля моря, депо з реагентами. Також суттєво впливає волога в поєднанні з сажею та гальмівним пилом (графітом), який утворюється в результаті зносу гальмівних колодок і контактних елементів (ковзунів, щіток) на залізничному транспорті та метрополітені.

Вологість 100 % із конденсатом на ізоляції трансформаторів — це не рідкість на залізницях (табл. 6).

Причини виникнення конденсату на ізоляції трансформаторів

Умова	Спосіб утворення
Атмосферна волога	Дощ, туман, Т сирий сніг → підвищення вологості до 100 % у шафах/ящиках
Перепади температури	Удень $+20^{\circ}\text{C}$, Уночі 0°C → конденсація в металевих шафах, ящиках, ЦСБ
Низька вентиляція	У закритих ящиках за слабкої циркуляції повітря
Протікання води	Через ущільнення, вводи, кабельні отвори — особливо на переїздах
Місця без підігріву	Узимку або восени у вологому повітрі → вода осідає на поверхні обмоток

У відповідальних системах залізничної автоматики для трансформаторів важливо вибрати **термічно стабільні, малогігроскопічні ізолятори**, особливо в середовищах з вологістю $>80\%$.

Ізоляційні матеріали трансформаторів (целюлоза, прескартон, масло) мають високу гігроскопічність. Навіть незначне зволоження суттєво знижує їхню електричну міцність. За даними IEEE Std C57.91 і CIGRÉ WG A2, збільшення вологості твердих ізоляцій з 0,5 до 3 % може знизити електричну міцність більш ніж удвічі. У середовищі трансформаторного масла це призводить до прискореного утворення часткових розрядів за напруги, нижчої за номінальну.

У трансформаторній діагностиці волога — одна з трьох головних причин відмов ізоляції (разом із перенапругами і старінням масла). Часткові розряди, спричинені зволоженням, — часта причина катастрофічних відмов у великих силових трансформаторах.

Отже, під впливом вологості паразитна ємність між елементами трансформатора (наприклад між обмотками та корпусом) може зростати у 2–10 разів у локальних зонах, особливо за наявності сильно зволоженої ізоляції. У типових умовах експлуатаційного зволоження характерне зростання становить 1.5–3 рази.

1.1.4. Паразитна ємність індуктивних дроселів завадозахисних фільтрів

Паразитна (міжвиткова або міжелементна) ємність індуктивних дроселів у завадозахисних

фільтрах (ЕМІ-фільтрах) залежить від кількох основних чинників:

- геометрія обмотки (кількість витків: чим більше витків – тим більша сумарна паразитна ємність; відстань між витками: менша відстань – більша ємність; тип намотування: шарова намотка має більшу ємність, ніж рознесена сегментована (із наявністю секцій у кожній обмотці)); двошарова чи багатошарова намотка підвищує ємність між шарами, наявності і форми секцій в обмотках та розташування їх шарів відносно поверхні магнітопроводу і входів-виходів обмоток дроселя;

- габарити і форма сердечника впливають на розміщення обмоток і електричне поле, компактні тороїдальні дроселі мають менші паразитні ємності, ніж інші типи з великою міжобмотковою площею;

- матеріал, проникність і опір сердечника: висока магнітна проникність дає змогу зменшити кількість витків і відповідно паразитну ємність, але безпосередньо на ємність не впливає; при цьому ферити з великим діелектричним проникненням можуть сприяти зростанню паразитної ємності; малий або частотнозалежний опір магнітопроводу суттєво зменшує опір для проходження завад;

- ізоляційні матеріали (матеріали з високою діелектричною проникністю між шарами або між витками збільшують паразитну ємність, покриття проводів (емаль, лак) мають свій внесок у діелектричну поведінку);

- зовнішні чинники: за підвищеної вологості ізоляційні властивості можуть змінюватися, що впливає на паразитну ємність; зміни температури впливають на геометричні розміри та діелектричні властивості матеріалів (наприклад розширення ізоляції – зміна відстані між витками);

- тип дроселя – симетричні (двообмоткові) дроселі мають більшу паразитну ємність між обмотками, які можуть створювати шлях для високочастотних завад; однообмоткові дроселі часто мають меншу паразитну ємність між обмотками.

Найбільше змінюється паразитна ємність дроселів в експлуатації від вологості і температури, особливо це стосується деяких частотно-залежних феритових магнітопроводів. Так, в індуктивних дроселів з магнітопроводами марки MnZn його питомий опір змінюється від вологості в сотні і тисячі разів, а разом навіть десятки тисяч разів [9]. Очевидно, таке зменшення опору може суттєво сприяти проходженню і впливу завад.

1.1.5. Вплив вологості на властивості оптронів як завадозахисних елементів

Одним із найбільш масових сучасних елементів захисту від завад є використання оптронів із малою паразитною ємністю і високою напругою ізоляції.

У вологому середовищі з RH = 100 % або за конденсації реальна витривалість оптронів на імпульсну напругу (1,2/50 μ s) може знизитися до 1000–2000 В, навіть якщо номінальна становить 6000–7000 В.

Паразитна ємність типових оптронів у сухій атмосфері - 25 °C і за вологості 40 % (RH) 0,4 - 1,0 пФ, вологій атмосфері (25–40 °C, 90–95 % RH) – 0,5 - 2,5 пФ. При цьому додається ємність друкованих провідників на платах. Для найпоширенішого матеріалу плат FR-4 вплив температури на його паразитну ємність до 15-20 %, вологості – до 5 %.

Із підвищенням вологості ізоляційний опір між входом і виходом оптрона може **змінюватися на декілька порядків, особливо в умовах наявності пилу, іонного забруднення або відкритого епоксидного корпусу.**

Напруга пробою між входом і виходом оптрона з підвищенням вологості може знижуватися на десятки відсотків, у крайніх випадках — у два-три рази, особливо:

- з конденсацією вологи всередині корпусу або на платі;
- за відсутності герметичного корпусу;
- наявності іонного забруднення (флюс, пил, сіль).

Отже, паразитна ємність оптрона внаслідок дії вологості може збільшуватися у 2-2,5 рази, а напруга пробою може зменшуватися на 25-40 %, за наявності конденсації вологи і забруднення – у два-п'ять разів.

1.1.6. Зміни ємності конденсаторів завадозахисних фільтрів від вологості в процесі експлуатації

Найбільш поширені елементи для захисту від зовнішніх і внутрішніх завад – конденсатори – можуть бути чутливими до вологості в місцях експлуатації пристроїв і систем залізничної автоматики. У табл. 7 надані зміни ємності конденсаторів від окремого чинника – вологості.

Зміна ємності конденсаторів від вологості

Тип конденсатора	Тип діелектрика	Максимальна зміна ємності від вологості (до 100 % RH)	Коментар
Керамічний (Class II/III)	BaTiO ₃ (X7R, Y5V тощо)	±10...±50 %	Найчутливіші до вологи, особливо Y5V
Керамічний (Class I)	NP0 / C0G	< ±1 %	Дуже стабільні
Плівковий (поліестер)	PET	±2...±5 %	Мала зміна, хороша стабільність
Плівковий (поліпропілен)	PP	±1...±2 %	Один із найстабільніших
Електролітичний (алюмінієвий)	Волога + рідкий електроліт	±10...±20 %	Волога впливає на герметичність і висихання
Танталовий (солід)	Танталоксид	±5...±10 %	Краще за електролітичні, але чутливі до герметизації
Паперовий	Папір (гігроскопічний)	до ±50 % і більше	Практично не використовувані через гігроскопічність
Слюдяний	Слюда	< ±1 %	Висока стабільність, використовують у НВЧ

Найчутливіші до вологи керамічні конденсатори класу II/III з діелектриком X7R, Y5V (особливо Y5V) і паперові. Електролітичні (алюмінієві) конденсатори також мають високу чутливість до вологості.

Найбільш стійкими до зміни ємності є керамічні конденсатори NP0/ C0G і слюдяні, які є дуже стабільними і майже не змінюються від вологості. Поліпропіленові конденсатори (PP) є достатньо стабільними за тривалої експлуатації.

Необхідно також урахувати і можливі зміни ємності конденсаторів від вологості разом зі зміною температури в процесі експлуатації. Так, за даними виробників, конденсатори зменшують свою ємність ще більше за рахунок вологості, температури і напруги:

- керамічні Y5V на 80-90 %;
- керамічні X7R на 60-70 %;
- алюмінієві електролітичні на 40–60 % (через 2000–5000 год експлуатації за рахунок підвищення температури, випаровування електроліту);
- танталові електролітичні на 20–30 % (є більш стабільними, але більш чутливими до перенапруги).

Аналіз цих даних показує, що ємність окремих типів конденсаторів може суттєво змінюватися від вологості в місцях розташування. У табл. 8 і 9 наведено швидкості зміни і відновлення ємності за впливів вологості.

Таблиця 8

Швидкість зміни ємності найпоширеніших типів конденсаторів після початку впливу вологості

Тип конденсатора	Зниження ємності після 12 год	Після 24 год	Коментар
Керамічний X7R (клас 2)	≈30–35 %	до 45–50 %	Швидка деградація
Керамічний Y5V (клас 3)	≈40–50 %	до 65–70 %	Найгірша стабільність
Керамічний NP0/C0G (клас I)	≈0 %	≈0 %	Майже не реагує на вологість
Плівковий (PET/PP)	≈2 %	≈4–5 %	Стабільний
Алюмінієвий електроліт	≈7–10 %	≈13–15 %	ESR може різко зрости
Танталовий	≈6–8 %	≈9–10 %	Середня стабільність

Таблиця 9

Швидкість відновлення ємності найпоширеніших типів конденсаторів після впливу вологості

Тип конденсатора	Початкові втрати	Відновлення	Коментар
------------------	------------------	-------------	----------

Керамічний X7R (клас 2)	до -50 %	дві-п'ять діб	Вразливий, потрібне сушіння
Керамічний Y5V (клас 3)	до -70 %	>5 діб, часткове	Найгірша стабільність
Керамічний NP0/C0G (клас I)	≈0 %	миттєве	Ідеальна стабільність
Плівковий (PET, PP)	≈-5 %	дві-три доби	Надійний для вологи
Алюмінієвий електроліт	≈-15 %	часткове	Ризик деградації, еквівалентний серійний опір (ESR) збільшується ↑
Танталовий	≈-10 %	одна-дві доби	Середня стійкість

Аналіз табл. 9 показує, що відновлення ємності відбувається поступово, тобто це дає змогу проводити випробування на ЕМС одразу після моделювання впливу вологості, що спрощує проведення комбінаційного випробування.

Необхідно враховувати і зміну ємності протягом експлуатації за рахунок старіння і зносу від комплексних факторів (табл. 10).

Оцінювання зміни ємності типових конденсаторів під час експлуатації

Тип конденсатора	Основний діелектрик	Типові зміни ємності за 5–10 років	Причини деградації	Стабільність
NP0/C0G (кераміка)	кераміка класу I	±1 %	Практично незмінна	● Висока
X7R, Y5V (кераміка)	кераміка класу II/III	-15 -70 %	Волога, температура, постійна напруга	● Низька
Плівкові (МКС, МБГ)	поліестер, поліпропілен	±2–5 %	Термічне старіння, волога	● Висока
Електролітичні (Al)	оксид алюмінію	-20–50 %	Висихання електроліту, температура	● Середня
Танталові	оксид танталу	-10–30 %	Напруга, старіння, діелектрика	● Середня
Суперконденсатори (від 1 Ф до >5000 Ф)	вуглецева структура	-10–50 %	Цикли заряджання-розряджання, деградація	● Низька
Паперові (старі типи)	просочений папір	-20–70 %	Гідроліз, волога, пробій	● Дуже низька

2. Теоретичний аналіз впливу зміни ємності заводозахисних елементів і каналів проникнення завод у чутливі електронні вузли

Аналіз роботи елементів заводозахисних елементів показує, що ємність під впливом вологості може змінитися дуже суттєво порівняно з даними виробника і призвести до відмови: короткого замикання, втрати контакту (обривання електричного кола), зменшення ємності, збільшення ємності (особливо в електролітичних і деяких керамічних типах), пробою, збільшення внутрішнього опору, вибуху/роздування.

Проаналізуємо теоретичні можливі зміни різних ємностей на електромагнітну стійкість, функційну та електромагнітну безпечність, а також випромінювання завод.

2.1. Вплив зміни ємності конденсатора в джерелах живлення з позиції впливу на електромагнітну сумісність

Конденсатори відіграють головну роль у джерелах живлення, забезпечуючи фільтрацію пульсацій і завод, стабілізацію напруги та накопичення енергії [10, 11]. Зміна ємності конденсатора (наприклад через вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, старіння, дефекти чи відхилення від номінального значення) може суттєво вплинути на вихідні характеристики джерела живлення, зокрема сигнали постійного (DC) і змінного (AC) струму [10–13].

У цій статті також розглянемо, як зміна ємності впливає на роботу джерела живлення, проаналізуємо зміни сигналів на виході та підкріпимо аналіз математичними виразами, включаючи ряди Фур'є [14, 15].

2.2. Вплив ємності на імпеданс конденсатора

Імпеданс конденсатора Z_C для змінного струму залежить від частоти (f) і ємності (C) [10]. Зменшення ємності призводить до зростання імпедансу, що погіршує здатність конденсатора пропускати змінний струм (AC) і посилює пульсації [12].

Збільшення ємності призводить до зменшення імпедансу, що покращує фільтрацію низькочастотних пульсацій, але може викликати перехідні процеси чи резонансні явища [13].

2.3. Вплив на сигнал постійного струму (DC)

У джерелі живлення постійного струму конденсатор зазвичай з'єднаний паралельно навантаженню після випрямляча, щоб згладжувати пульсації [10]. Розглянемо типовий мостовий випрямляч із конденсатором фільтра.

2.3.1. Пульсації вихідної напруги

Вихідна напруга після випрямляча має пульсації, які залежать від ємності C , частоти мережі f , наприклад 50 Гц, струму навантаження I_L та періоду пульсацій $T = 1/f$.

Амплітуду пульсацій ΔV наближено визначають за відомим рівнянням [13]

$$\Delta U \approx \frac{I_L T}{C} = \frac{I_L}{fC} \quad (1)$$

Якщо зменшується ємність (наприклад через старіння), то пульсації зростають, що призводить до погіршення якості вихідної напруги [12]. У разі збільшення ємності стабільність напруги покращується [11].

2.3.2. Подання пульсацій рядом Фур'є

Пульсації напруги після випрямляча можна апроксимувати періодичною функцією (наприклад пилоподібною хвилею для однопівперіодного випрямляча). Для пилоподібного сигналу з періодом T та амплітудою ΔV ряд Фур'є має вигляд [15]

$$v(t) = \frac{\Delta V}{2} - \frac{\Delta V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n f t)}{n} \quad (2)$$

де $f = 1/T$ – частота пульсацій (наприклад 100 Гц для мостового випрямляча за умови 50 Гц мережі).

Конденсатор діє як низькочастотний фільтр, послаблюючи високочастотні гармоніки. Послаблення гармонік залежить від імпедансу конденсатора для кожної гармоніки [14]:

$$|Z_C(n)| = \frac{1}{2\pi n f C} \quad (3)$$

Зменшення ємності: зростання $|Z_C(n)|$ послаблює фільтрацію, що призводить до збільшення амплітуд вищих гармонік у спектрі пульсацій [15].

Збільшення ємності: зменшення $|Z_C(n)|$ покращує фільтрацію, знижуючи амплітуди гармонік [14].

2.3.3. Вплив на спектр сигналу

Зміна ємності впливає на гармонійний склад вхідного струму. Без належної ємності вхідний струм стає більш нелінійним, що збільшує гармонійні спотворення [14]. Спектр струму можна подати як ряд Фур'є [15]:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(2\pi n f t + \varphi_n) \quad (4)$$

Зі зменшенням ємності амплітуди вищих гармонік I_n зростають через погіршення фільтрації [14].

Зі збільшенням ємності низькочастотні гармоніки можуть бути надмірно послаблені, але виникає ризик резонансу на певних частотах, якщо ємність утворює LC-контур із індуктивністю трансформатора [16].

Частота резонансу LC-контур

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

де L — індуктивність обмотки трансформатора.

Зміна ємності зсуває частоту резонансу $f_{\text{рез}}$, що може викликати небажані коливання [16].

Амплітуда n -ї гармоніки пульсацій після фільтрації конденсатором пропорційна [15]:

$$U_n \propto \frac{\Delta V}{n} \cdot \frac{1}{1+(2\pi n f R_L C)^2} \quad (6)$$

Зі зменшенням ємності значення $2\pi n/R_L C$ зменшується, що збільшує внесок вищих гармонік, погіршуючи якість сигналу [14].

2.3.4. Вплив пульсацій на функційну безпечність.

У стандартах IEC 61508, EN 50126/50129 є вимоги щодо перевірки впливу завад, у тому числі за пульсацій у мережах живлення. Але немає вимог щодо контролю в процесі експлуатації. Тому треба дослідити, наскільки впливають на рівні пульсацій різні чинники, у тому числі ті, які одночасно впливають на формування залежних (кратних) небезпечних відмов у каналах резервування відповідальних систем керування рухом поїздів.

Збільшення пульсацій у мережі живлення постійного струму може призвести до небезпечної роботи пристроїв сполучення мікропроцесорних засобів із виконавчими пристроями, наприклад контролерів виведення дискретних сигналів із реле першого класу надійності, які виконують функції безпеки на залізничному транспорті. Унаслідок пульсацій у таких схемах, побудованих за динамічними принципами, можуть вмикатися несанкціоновано двигуни стрілок, автошлагбаумів, дозволяючи сигнали на світлофорах тощо.

Класичним елементом, широко застосовуваним у залізничній автоматизації, є перетворювач полярності, який забезпечує захисний стан за всіх одиничних і кратних відмов і з точки зору функційної безпеки є надійним. Проте з появою пульсацій на вході або порушенням фільтрації такий пристрій може переходити в небезпечний стан, що не контролюється стандартними методами діагностики.

Практичний приклад. Під час випробувань перших дослідних зразків електронної системи підрахунку осей рухомого складу на металургійному комбінаті «Запоріжсталь» було використано перетворювач полярності з живленням постійним струмом ± 24 В. У процесі експерименту зменшення ємності конденсатора, що забезпечував згладжування пульсацій, призвело до ситуації, коли колійне реле рейкового кола хибно сприйняло імпульсну напругу як номінальний сигнал для спрацювання. Унаслідок цього система передчасно сформувала сигнал вільності колійної дільниці за фактичної наявності на ній рухомого складу. У разі позитивного завершення сертифікаційних випробувань і допуску такої системи до експлуатації подібна відмова могла б спричинити небезпечну помилку функціонування, що прямо суперечить вимогам до SIL4 відповідно до EN 50129, і в екстремальному випадку стати причиною залізничної аварії або катастрофи.

Отже, підвищення рівня пульсацій напруги живлення може призвести до появи високочастотних електромагнітних завад, які впливають на навантаження шляхом утворення кондуктивних

(провідникових) завад. Такі завади здатні спричинити некоректну роботу або відмови мікроелектронних пристроїв, особливо в системах із високим ступенем інтеграції. Подібне зниження електромагнітної стійкості призводить до суттєвого зменшення рівня функційної безпеки (SIL) за реальної експлуатації. Особливу небезпеку становлять ситуації, коли пульсації з'являються одночасно в кількох каналах резервування, спричиняючи однаковий вплив на ідентичні елементи всіх каналів. Це створює умови для кратних (множинних) відмов, тобто відмов, які перетинають бар'єри резервування і виходять за межі передбачених сценаріїв безпечної деградації. Такі збої та відмови прямо суперечать принципам незалежності резервних каналів згідно з EN 50129 та IEC 61508.

2.3.5. Вплив пульсацій на допустиме випромінювання та електромагнітну безпечність

Пульсації вихідної напруги постійного струму безпосередньо впливають і на рівень випромінювання електромагнітних завад.

Реальна вихідна напруга блока живлення завжди має пульсації – залишкові хвилі, спричинені перетворенням енергії (наприклад після випрямляча або в імпульсному перетворювачі). Пульсації – це високочастотні електромагнітні завади, які можуть бути випромінені у простір через провідники, корпус або кабелі.

Допускаючи в експлуатацію системи, проводять відповідні випробування на допустиме випромінювання (емісію), у тому числі й сертифікаційні на виконання допустимих вимог стандартів, наприклад ДСТУ EN 50121-4 для залізничної автоматики, EN/IEC 61000-6-4 для промислового середовища, EN 55011/EN 55032 (CISPR), у яких чітко обмежені рівні випромінювання, включаючи ті, що можуть бути спричинені пульсаціями. Але в процесі експлуатації ці пульсації можуть бути збільшені за рахунок зменшення ємності конденсаторів у джерелах живлення, а також збільшення загальної паразитної ємності внаслідок впливу вологості та негативно впливати на довкілля та електромагнітну безпечність оперативного навченого персоналу.

3. Загрози для ЕМС і функційної безпеки

1. Значна частина пристроїв залізничної автоматики функціонують в умовах підвищеної вологості протягом тривалого часу, тому одночасний вплив завад і вологості – це звичайне явище, яке може призводити до недопустимих змін деградації завадозахисних елементів і більш легкого проникнення завад до чутливих електронних елементів.

2. Проведені дослідження показали, що вплив вологості є суттєвим чинником для зменшення стійкості до небезпечних впливів імпульсних завад і радіочастотного електромагнітного поля, що може призвести до небезпечних відмов і погіршення функційної безпечності. Волога на платах або роз'ємах створює додаткові струмопровідні шляхи для завад. Вологе середовище змінює електричні характеристики друкованих плат, кабелів, трансформаторів. Реальна вологість може в кілька разів змінити завдостійкість пристроїв і систем.

3. Одночасний вплив внутрішніх завад і вологості також може призвести до збільшення електромагнітного випромінювання від електронних пристроїв і систем, який також може впливати на довкілля, електромагнітну безпеку оперативного навченого персоналу, негативно впливати на інші пристрої автоматики і зв'язку.

4. Волога змінює паразитну ємність і провідність ізоляцій, знижує ефективність ЕМС-фільтрів, може створити струмопровідні шляхи, яких нема в сухому середовищі. Без комбінованих тестів (ЕМС+вологість) можна не виявити приховані відмови, що виникають лише за грозових або комутаційних імпульсних перенапружень і конденсату одночасно.

5. Вплив вологості на конденсатори фільтрів може принципово змінити рівень стійкості пристроїв залізничної автоматики до небезпечного впливу завад. Це не частковий вплив цього чинника – це можуть бути сотні відсотків похибки результатів випробувань на ЕМС-тест для підтвердження функційної безпечності. Так, зменшення ємності на 50 % може зменшити загасання фільтрів у два-п'ять разів, а зміна на 90 % призводить до втрати загасання на цільовій частоті майже повністю. Зменшення ємності на 50 % зменшує ефективність часової селекції сигналів і завад в 1,8 - 2 рази, зміна на 90 % – 5-10 разів. Найпростіший RC-фільтр при цьому втрачає до 90 % ефективності часової селекції.

6. Сертифікуючи продукцію, для відповідальних пристроїв і систем, що безпосередньо впливають на безпеку руху поїздів, потрібно пройти всі необхідні стандартизовані тести на функційну безпечність, але реальні умови експлуатації можуть критично знизити рівень стійкості до електромагнітних завад в умовах реальної вологості і призводити до небезпечних станів.

7. Проведення комбінованих тестів (ЕМС+вологість) ускладнює випробування і сертифікацію, хоча в деяких випадках відновлення електричних параметрів елементів після впливу вологи відбувається повільно, що дає можливість проводити стандартні тести одразу після проведення

кліматичних випробувань (температура, вологість) без додаткових ускладнень.

8. Прорахунки функційної безпечності, особливо їхні наслідки, у разі ігнорування комплексної дії завад у реальних умовах експлуатації можуть бути фатальними.

Висновки за результатами дослідження

1. З урахуванням загроз для ЕМС і функційної безпеки необхідно враховувати можливі наслідки впливу вологості на параметри завадозахисних пристроїв і каналів проникнення завад.

2. Для відповідальних систем із високим рівнем SIL потрібно ретельно вибирати елементи і пристрої захисту від завад із мінімальними змінами в умовах вологості та температури.

3. Фахівцям із сертифікації і аудиторам надавати окремий звіт щодо врахування чинника вологості для постійної експлуатації і мінімізації деградації елементів захисту від вологості.

4. Пропоновано з випробуваннями на ЕМС і функційну безпеку моделювати прогнозовані зміни каналів паразитного зв'язку в умовах підвищеної вологості, у тому числі за портами живлення, введення і виведення інформації.

5. Формальним показником якості ЕМС систем може бути значення паразитної ємності між внутрішньою структурою системи з усіма зовнішніми портами проникнення завад, у тому числі в режимах моделювання на стендах реальної вологості (за допомогою спеціальних вимірювачів ємності).

6. Для систем із високими вимогами щодо функційної безпеки (рівней SIL) необхідно проводити випробування на стійкість до завад разом зі зміною вологості та ємності конденсаторів фільтрів, тому що вологість змінює ємність конденсаторів достатньо швидко.

7. Впроваджувати моніторинг деградації конденсаторів, оптронів, розрядників, варисторів та інших відповідальних елементів захисту від завад (вимірювання ємності, напруги пробією, імпульсної ізоляції) за необхідності резервування і автоматичного підключення резервних пристроїв захисту.

8. З метою виключення одночасного впливу імпульсів завад на апаратні та програмні елементи системи в різних каналах резервування більш жорсткими мають бути вимоги щодо його використання, потрібно використовувати різне апаратне та програмне забезпечення з незалежними пристроями захисту від завад в окремих каналах резервування.

9. Міжнародні, європейські і національні стандарти потребують перевірки на стійкість пристроїв і систем залізничної автоматики до зміни

температури і вологості, підкреслюють важливість цих факторів для забезпечення надійності і функційної безпечності, але в разі нормування електромагнітної сумісності та функційної безпечності не регламентують вимоги до багатофакторних випробувань на функційну безпечність, зокрема на одночасний вплив дуже важливих чинників «завада+вологість». Тому потрібно розробити зміни щодо впровадження в цих стандартах і галузевих методиках комбінованих випробувань на ЕМС і функціональну безпеку.

10. Підтвердженням необхідності врахування вологості в поєднанні з електромагнітними завадами деякою мірою дають у світі тільки стандарти MIL-STD-461G, MIL-STD-810H (військова ЕМС і середовище) – метод 507.6 (вологість), у поєднанні з методом 510 (ЕМІ). Але ці вимоги не є обов'язковими, вони мають бути виконані тільки за потребою замовника. Частково врахована комбінація «вологість +ЕМС» у стандарті ISO 16750-4:2023 на електронне обладнання автомобілів (випробування на ЕМС проводять після витримування обладнання в умовах підвищеної вологості). Досвід використання цих стандартів пропонувано врахувати для корегування відповідних нормативних документів з ЕМС і функційної безпеки.

11. В умовах вологості імпульсні перенапруги, наприклад швидкі перехідні процеси (EFT), мікросекундні всплески (Surge), розряди статичної електрики (ESD), викликають більш часті, глибокі та небезпечні порушення функціонування систем.

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 50121-4: 2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 4. Емісія завад і несприйнятливість сигнальної та телекомунікаційної апаратури (EN 50121-4:2016, IDT).
2. ДСТУ EN 50121-3-2:2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 3-2. Рухомий склад. Апаратура (EN 50121-3-2:2016, IDT).
3. ДСТУ EN 50121-5:2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 5. Емісія завад і несприйнятливість стаціонарних установок електроживлення та апаратури (EN 50121-5:2017, IDT).
4. Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів: затв. та введ. в дію наказом «Укрзалізниця» № 452-Ц від 17.08.2001 р. Київ: Вид. ПП «Алькор», 2002. 106 с.
5. Єрмоленко Л. П. Електромагнітні завади на залізничному транспорті: теоретичні засади та класифікація. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 3. С. 31-36.
6. Гаврилюк В. І. Модель впливу тягового струму на тональні рейкові кола. *Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*. 2011. С. 6-10. URL: crust.ust.edu.ua.
7. Гаврилюк В. І., Завгородній О. В. Електромагнітний вплив тягової мережі на рейкові кола. Моделювання тягового струму в рейковій лінії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2007. № 4. С. 53-57.
8. СОУ45.020-00034045-002:2006. Вироби залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку. Загальні технічні умови. Київ: Укрзалізниця, 2006. 80 с.
9. Kustov V. F. & Neychev O. V. (1993). Chokes for interference-suppressing filters. *Telecommunications & Radio Engineering*. 48(10). 132–135.
10. Сивухін Д. В. Загальний курс фізики: підруч. для студ. фіз. спец. ВНЗ. Т. 3. Електрика: пер. з рос. Київ: Либідь, 2009. 512 с.
11. Хоровиц П., Хилл У. Мистецтво схемотехніки: підруч. для студ. техн. ВНЗ: пер. з англ. Вид. 5-те. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. 960 с.
12. Бессонов Л. А. Теоретичні основи електротехніки: підруч. для студ. електротех. спец. ВНЗ: пер. з рос. Київ: Вища школа, 2005. 688 с.
13. Касаткін А. С., Немцов М. В. Електротехніка: підруч. для студ. техн. ВНЗ / за ред. А. С. Касаткіна. Вид. 4-те, перероб. і доп. Київ: Академія, 2020. 512 с.
14. Опадчий Ф. Ф., Попов В. А. Аналіз сигналів і систем: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Київ: Вища школа, 2012. 320 с.
15. Брейсуелл Р. Н. Перетворення Фур'є та його застосування: монографія: пер. з англ. Київ: Наукова думка, 2003. 400 с.
16. Атабеков Г. І., Сидоров В. П. Тиристорні перетворювачі частоти: монографія: пер. з рос. Київ: Техніка, 2016. 280 с.
17. Ogunsola A., Mariscotti A. (2013). Signalling and Communication Systems. In: *Electromagnetic Compatibility in Railways. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 168. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30281-7_3.
18. Chauhan R. S. (2020). Variation in Capacitance of Ceramic Capacitors Due to Humidity. *Journal of Advanced Research in Power Electronics and Power Systems*. 7(3). 27–29. docs.nrel.gov+12.

19. Bilgic M., Tekin I. Parasitic Capacitance Impact on Cable EMC Performance under Moist Conditions. *IEEE EMC Symposium*. 2022.

20. Grebenyuk S., Sokolov V. Analysis of Degradation of EMI Protection Devices in Railway Systems. *JIKS*. 2022.

21. RSRail 2022 Proceedings Combined EMC and environmental stress testing of safety-critical railway electronics.

22. IEEE EMC+SIPI Demos 2024. Practical studies on environment-driven EMC degradation. emc2024.org.

The influence of humidity on the degradation of protection elements and parameters of interference penetration

Abstract. *The article investigates the impact of increased humidity on the degradation of electromagnetic interference (EMI) protection components and on changes in the electrical parameters of interference propagation channels in railway automation systems. It has been established that under high humidity conditions, the electrical characteristics of frequency filters, time selectors, protective capacitors, voltage limiters, and optocouplers undergo significant changes, resulting in reduced effectiveness of protection against impulse and high-frequency disturbances. The study shows that moisture substantially increases the parasitic capacitance of galvanic isolation elements — both between conductors and between conductors and the chassis — while also reducing the electrical resistance of insulation materials.*

These effects contribute to enhanced transmission of impulse and high-frequency disturbances into critical electronic circuits. It was found that even with fully functional protective elements, the level of interference penetration may exceed permissible limits due to environmental influences. This poses serious risks to electromagnetic compatibility (EMC) and functional safety (SIL) of train control systems, particularly due to the simultaneous impact of humidity on all redundancy channels, potentially leading to multiple dangerous failures and increasing the risk of accidents or catastrophes in railway transport.

The article proposes recommendations for updating the testing standards of railway automation devices to account for climatic factors and inter-conductor capacitive coupling channels. The results of the study may be valuable for developers, auditors, and certification bodies involved with electrical, electronic, and programmable electronic control and monitoring systems operating under stringent functional safety and EMC requirements.

Keywords: *humidity, electrical/electronic/programmable electronic control systems, electromagnetic compatibility, electromagnetic*

interference, immunity, dangerous failures, SIL levels, railway automation systems, functional safety.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9773-5470. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Kustov Viktor, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9773-5470. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoaa@kart.edu.ua.

Prylypko Andrii, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoaa@kart.edu.ua.

УДК 004.9

DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.336439

БРИКСІН В. О., к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту,

ЗАРИЦЬКИЙ А. М., аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту

Визначення ефективності використання методів глибокого навчання для виявлення полів технічних культур за допомогою аналізу супутникових зображень

Анотація. У статті описано дослідження методів комп'ютерного зору, які використовують для розпізнавання супутникових зображень. У дослідженні зазначено, що згорткові нейронні мережі (CNN), UNet і Mask R-CNN є найефективнішими моделями для сегментації супутникових зображень. Ці моделі допомагають виділити поля сільськогосподарських культур із необроблених супутникових зображень. Інший метод, згаданий у статті, передбачає класифікацію з використанням RGB-зображень чи зображень із різних спектральних діапазонів, засновану на трансферному навчанні з інших доменів, таких як ImageNet.

Ключові слова: комп'ютерний зір, розпізнавання зображень, згорткові нейронні мережі (CNN), сегментація зображень, трансферне навчання.

Вступ.

Тема дослідження обумовлена актуальністю завдань визначення термінів визрівання посівів технічних культур та обсягів урожаю, зокрема в контексті застосування штучного інтелекту на основі аналізу супутникових зображень. Великі обсяги даних і неспроможність повного і своєчасного їх отримання потребують упровадження ефективних методів аналізу для вдосконалення планування логістики, передбачення та мінімізації ризиків, а також максимізації прибутків.

За традиційних методів обробки даних стикаються з викликами, пов'язаними з неможливістю своєчасного отримання та обробки даних про обсяги посівних кампаній, запланованих і реалізованих великою кількістю не пов'язаних між собою організацій, що призводить до обмежень у точності та швидкості обрахунків. Використання сучасних моделей аналізу зображень за допомогою штучного інтелекту дає змогу швидко надати впорядковану інформацію для ухвалення обґрунтованих рішень на основі використання доступних джерел супутникових зображень.

Визначення мети та завдання дослідження.

© БРИКСІН В. О., ЗАРИЦЬКИЙ А. М., 2025

Метою дослідження є визначення ефективності використання методів глибокого навчання для виявлення полів технічних культур за допомогою аналізу супутникових зображень, а також визначення найбільш перспективного підходу.

Основна частина дослідження.

Нижче наведено опис і дослідження декількох запропонованих підходів, пов'язаних з оцінюванням площі полів технічних культур, на основі аналізу супутникових зображень із використанням сучасних методів штучного інтелекту, зокрема комп'ютерного зору (computer vision) [1-3].

Перший підхід використовує глибинне навчання та методи контрольованої сегментації для аналізу супутникових зображень, що дає змогу точно виділяти поля. Найефективнішою групою моделей аналізу зображень за допомогою штучного інтелекту для нашого дослідження є підходи глибинного навчання (deep learning [4]) для комп'ютерного зору. Вони найбільш корисні для першого етапу виявлення полів. Таку задачу можна розв'язати за допомогою повністю згорткової нейронної мережі (fully convolutional neural network [5]) або UNet [6] чи Mask R-CNN [7], що є методами контрольованої сегментації зображень (supervised image segmentation) (рис. 1).

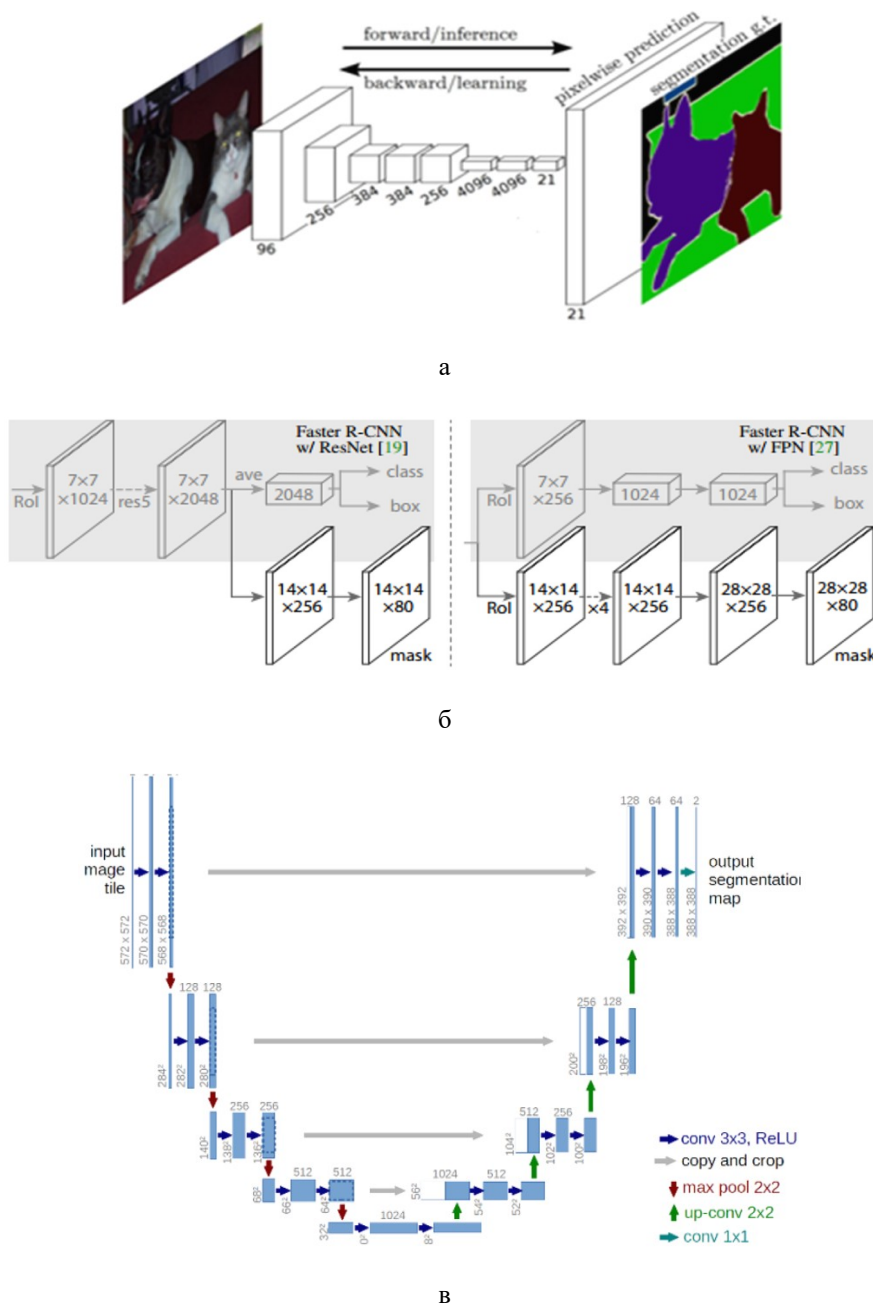


Рис. 1. Методи контрольованої сегментації зображень:

а – Convolutional neural network; б – Mask R-CNN; в – U-Net

Усі ці моделі сфокусовані на піксельному витягу об'єктів/областей поля із необроблених (у нашому випадку супутникових) зображень, які можна отримати з різних агрегаторів супутникових зображень. Для такого підходу необхідний позначений набір даних, що має бути репрезентативним (описувати більшість варіантів змін зображень із різними кутами обертання, різними умовами навколишнього середовища, змінами освітлення протягом циклу вирощування та врожайності та ін.) і містити достатню кількість зразків. Для деяких ефективних архітектур глибокого навчання потрібно тисячі позначених полів

(наприклад PASCAL VOC dataset [8]) із полігонами. Зазвичай цей набір даних можна розширити за допомогою певних методів нарощення (augmentation).

Це основна частина такого підходу, і вона є найбільш складною. Після неї застосовують типові задачі, такі як оцінювання площі на піксель (використовуючи масштаб, відомі перепади висоти та ін.). Після цього можна легко підсумувати всі площі. Але враховуючи те, що, по-перше, ми маємо реальні площі за багато років (тобто вибірка історичних даних є доволі великою), а також можемо перевіряти супутникові дані в динаміці для підвищення точності, то можна зробити висновок, що таке рішення не є

оптимальним. По-друге, усі отримані в результаті гектари не завжди рівнозначні з точки зору врожайності (рис. 2).

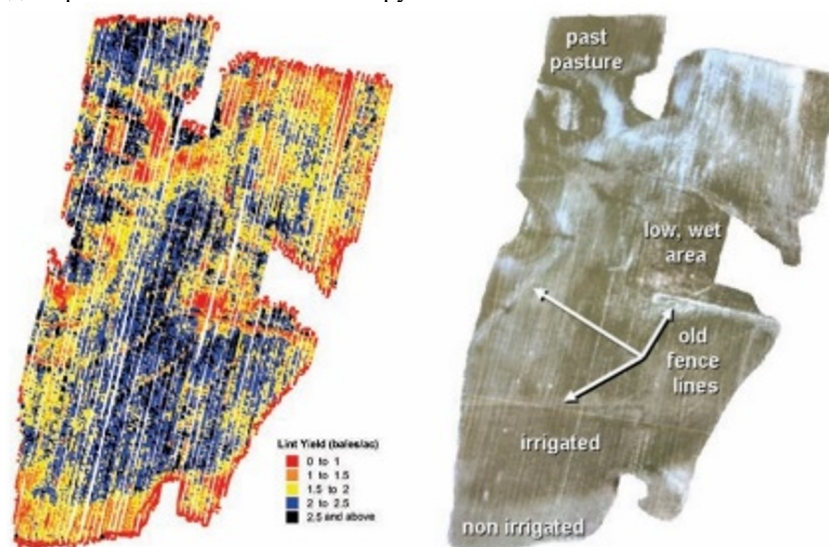


Рис. 2. Приклад невідповідності результатів використання моделі відносно реальних факторів впливу на врожайність

Отже, усі отримані в результаті гектари не дорівнюють реальній площі чи площі, оціненій у результаті поділу на врожайність. Тому на фінальному етапі краще додавати до суми гектарів або їх розподілу певний комбінований коефіцієнт, за допомогою якого можна відкорегувати отримані дані для співставлення з реальними історичними даними.

З іншого боку, навчання на такому невеликому наборі даних може призвести до значних відхилень у навчанні: модель навчатиметься певним ознакам, які є загальними лише для невеликих підмножин і не є

відмінностями від інших типів полів чи супутникових об'єктів, а також які можуть не характеризувати поля вибраної технічної культури. Існує певна можливість використовувати інше супутникове подання якості зразків із дистанційного зондування, але вони також мають бути перевірені на більшому наборі даних. Іншим шляхом може бути знаходження певних часових інтервалів (з 25-тижневого циклу врожаю), у межах яких можуть бути деякі відмінності як у RGB-зображеннях, так і записих з інших частотних діапазонів (рис. 3).

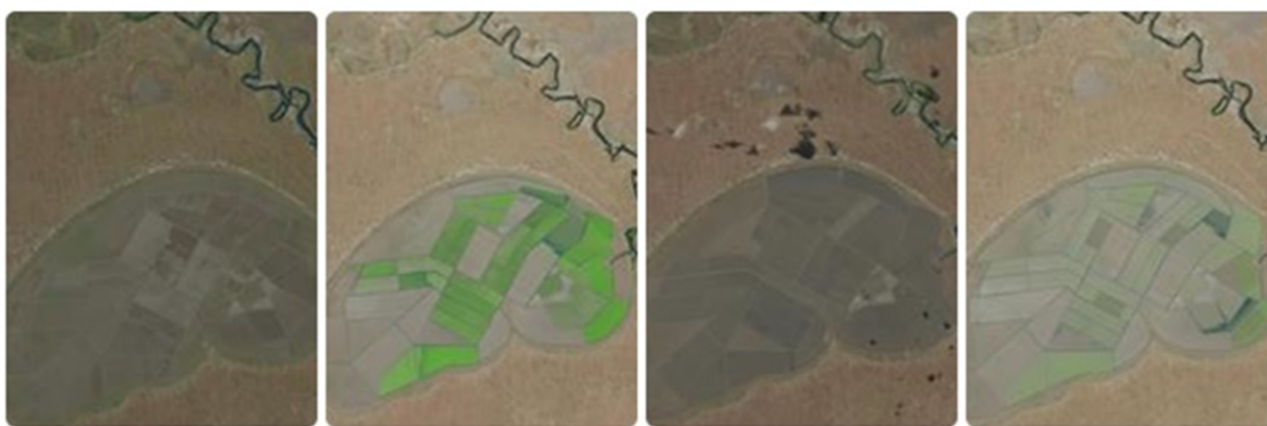


Рис. 3. Приклад RGB-зображень із різних часових інтервалів із відмінностями

Існує **другий підхід**, за якого обробляють усі області, що включають поля вибраної технічної культури, використовуючи деякий пороговий рівень імовірності на основі певного діапазону частот, спектрів RGB чи коефіцієнтів інтервалів. Для цих

областей можна провести агрегацію (із можливістю трансферного навчання (transfer learning) із поточних натренованих коефіцієнтів (estimators), адже існує гіпотеза, що коефіцієнти, які можуть виділяти типові форми з несупутникових або немаповних зображень (наприклад ImageNet [9, 10]), можуть бути

використані в цьому випадку). Згодом цю агрегацію можна співставити з історичними даними про площі чи об'єднати в певну згорткову (convolutional) архітектуру з неперервною (лінійною) активацією для вихідних даних.

Однак цей підхід не настільки ефективний, як попередні методи, оскільки навіть для задач класифікації (що є простішою задачею, ніж виявлення відмінностей між класами) глибокі нейронні мережі (DNN) [11] забезпечують близько 80-90 % точності за наявності великих наборів даних і достатнього часу на навчання. Окрім того, всередині виявлених областей будуть інші поля, які матимуть свої власні ознаки, відмінні від наших результатів. Кількість історичних даних (навіть із 1978 року, коли супутники ще навіть не були доступні) недостатня для запропонованого рішення.

Основні вимоги або важливі моменти для застосування цього підходу:

- достатня кількість позначених полів;
- агрегація великої кількості полів/поверхонь потребує багатьох зразків (що відповідає рокам спостережень);

Порівняння підходів за критеріями

Критерій	Підхід 1: глибинне навчання з контрольованою сегментацією	Підхід 2: порогова агрегація з використанням коефіцієнтів
Точність	Висока (за умови великого позначеного набору даних)	Середня (80-90 % у класифікаційних задачах)
Вимоги до даних	Велика кількість репрезентативних даних	Необхідність довготривалих історичних даних
Гнучкість	Чутливий до змін умов знімання (кут, освітлення)	Використовує спектральний аналіз, але може містити хибні об'єкти
Обсяг обробки	Потрібне глибоке навчання, потребує часу та ресурсів	Агрегація може бути швидшою, але менш точною
Можливість нарощування	Підтримує аугментацію для розширення набору даних	Додаткове навчання може допомогти, але ефект обмежений
Складність реалізації	Висока, потребує сегментаційних моделей	Нижча, але агрегація потребує аналізу точності
Якість сегментації	Висока за достатнього набору даних	Може бути низькою через відмінності полів

Валідація гіпотези. Гіпотеза: бавовняні поля можна відрізнити за значеннями пікселів спектральних зображень і нормалізованого диференційного індексу вегетації (NDVI)*.

*NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) розраховують на основі видимого та ближнього

• наявність супутникових даних за вибрані історичні періоди;

• очікувана продуктивність гірша, ніж у попереднього методу;

• агрегація супутникових даних потребує багато часу;

• сегментація може бути виконана з низькою якістю (через подібність і/або суттєві відмінності між полями різних технічних культур).

Ці рішення є найбільш чіткими та мають практичне обґрунтування, проте існують інші гіпотези та підходи.

Детальне порівняння підходів за критеріями наведено в таблиці.

інфрачервоного світла, що відбиває рослинність. Здорова рослинність поглинає більшість видимого світла, яке на неї падає, і відбиває велику частину ближнього інфрачервоного світла. Нездорова чи розріджена рослинність відбиває більше видимого світла і менше ближнього інфрачервоного (рис. 4).

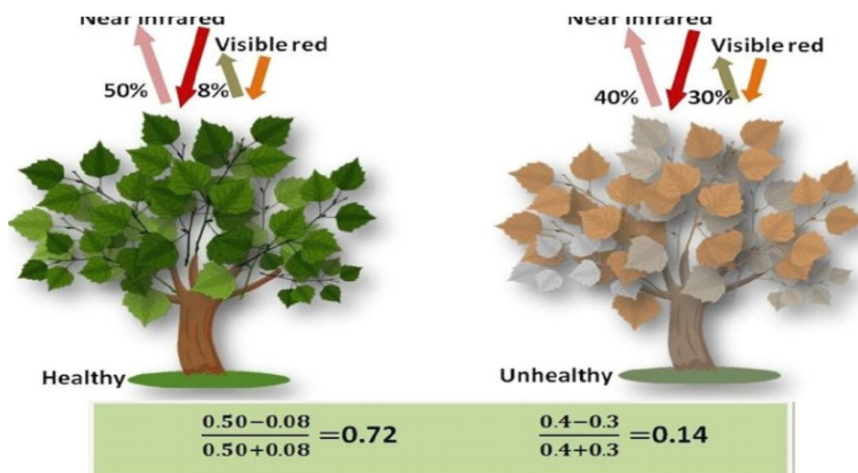


Рис. 4. Принцип, на якому базований NDVI індекс

Контрольні точки було нанесено на мапу (рис. 5).

Дані: набір контрольних точок (Ground Truth Points (GTP)) із їхніми координатами. 83 контрольні точки (51 – бавовна, 32 – інші культури, такі як помідори, кукурудза тощо).

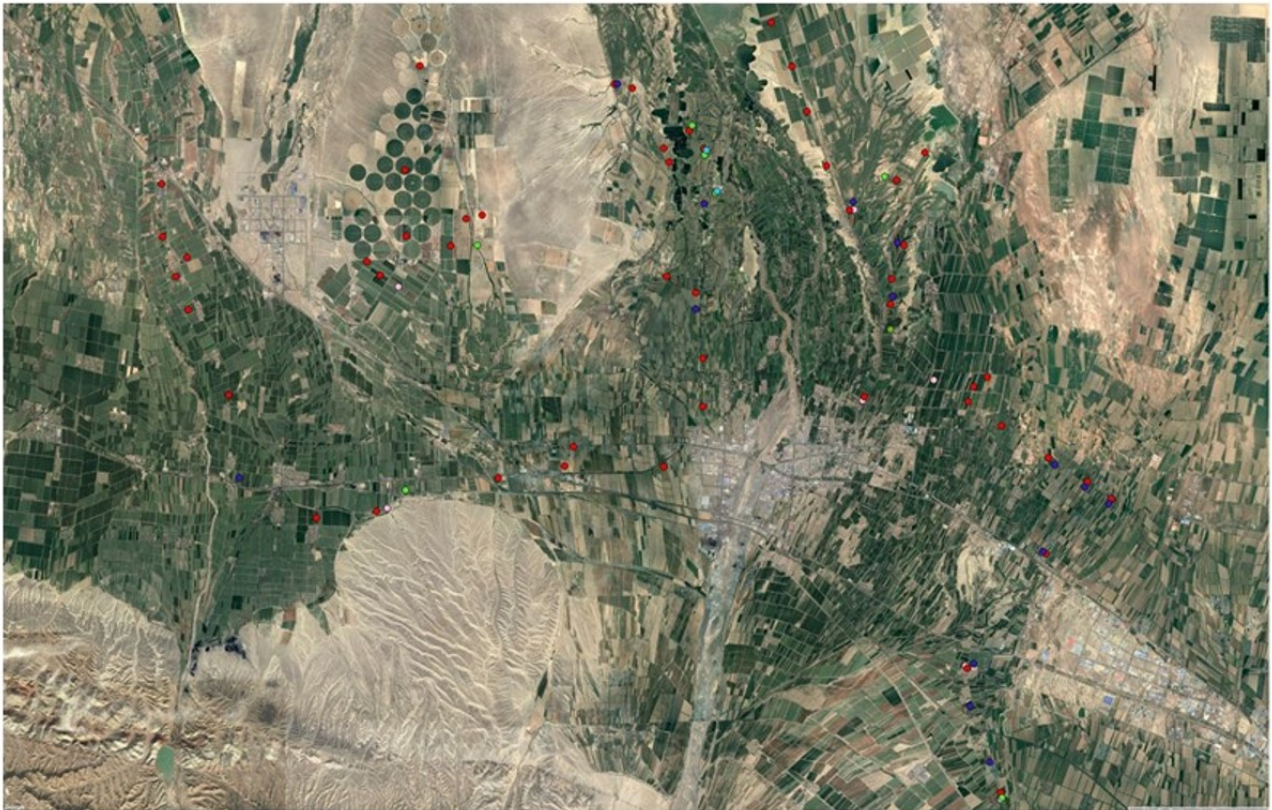


Рис. 5. Контрольні точки (GTP), нанесені на мапу Google Maps

Було вибрано супутник Landsat-8 як основне джерело зображень (рис. 6) та отримано 19 зображень Landsat-8 за 2021 рік у такий спосіб, що:

- кожне зображення містить 11 спектральних діапазонів;

- кожне зображення має приблизну роздільну здатність 8000x8000 пікселів;
- кожен піксель відповідає площі 30 м².

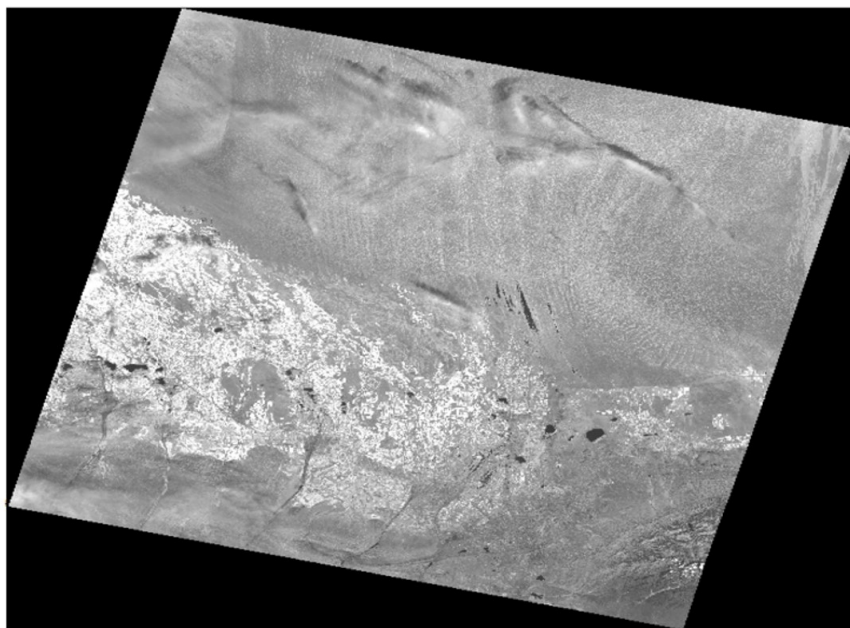


Рис. 6. Приклад зображення, отриманого з Landsat-8

Попередня обробка (рис. 7):

- кожна координата була скорегована так, щоб перебувати щонайменше за 150 м від межі поля;
- для кожної з 83 точок було вирізано прямокутники розміром 10x10 пікселів (300x300 м)

навколо кожної точки. Цей процес було виконано для кожного спектрального діапазону;

- зображення було згруповано в папки відповідно до дати отримання.

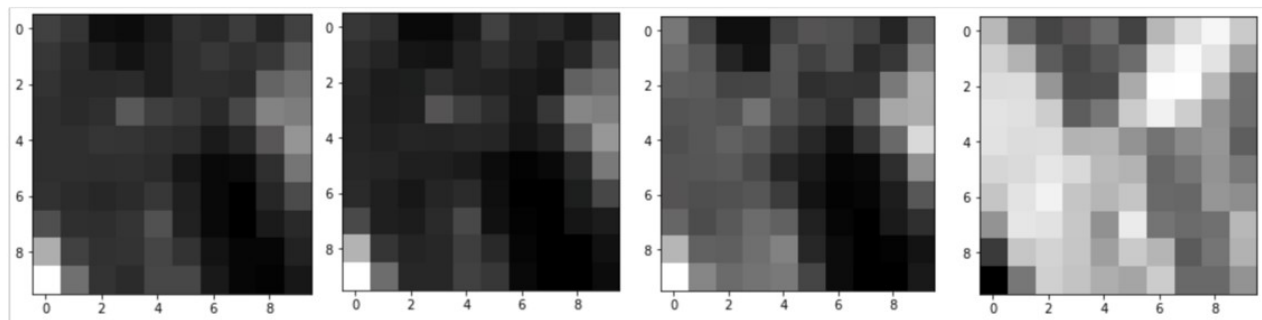


Рис. 7. Приклади патчів для конкретного поля

спектральних діапазонів (11 спектральних діапазонів для 19 дат) (рис. 8);

Використані ознаки:

- кожен вектор ознак (feature vector) було побудовано з використанням значень пікселів для кожної часової позначки і всіх доступних

- до векторів ознак також додано NDVI для кожної часової позначки.

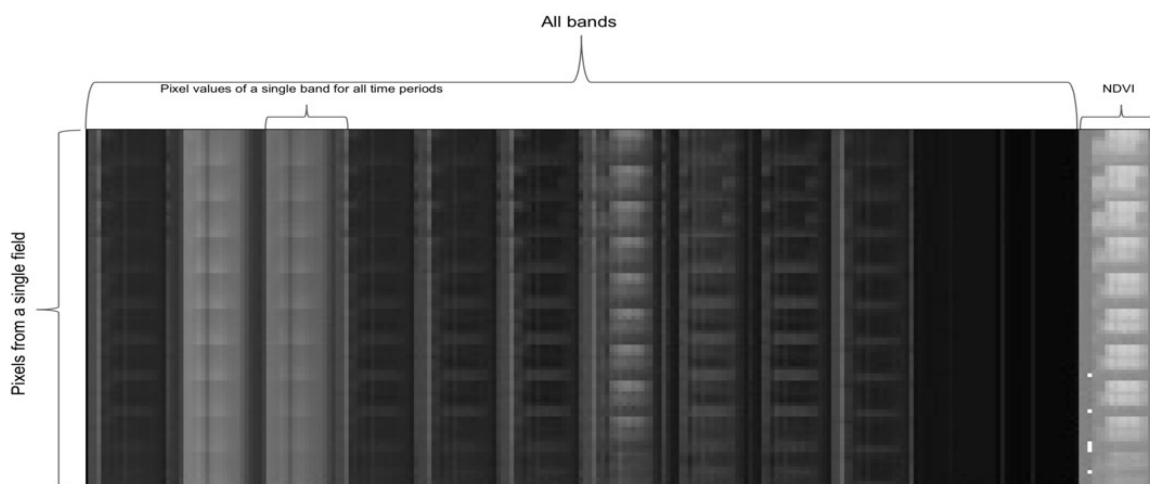


Рис. 8. Візуалізація векторів ознак для конкретного поля

допомогою техніки градієнтного посилення (gradient boosting);

Результати валідації:

- було використано кілька різних алгоритмів машинного навчання для тренування моделі (див. журнал нижче). Найбільш точні результати, за оцінкою F1 (F1 score** (це середньозважене значення точності та повноти. Тому цей показник враховує як хибно-позитивні, так і хибно-негативні результати. Інтуїтивно зрозуміти цей показник складніше, ніж точність, але оцінка F1 зазвичай є більш корисною, ніж проста точність, особливо якщо у вас є нерівномірний розподіл класів)), було досягнуто за

- найвища поточна оцінка F1 - 0.75 із такими параметрами: точність (precision) = 0.61, повнота (recall) = 0.98 відповідно;

- усі валідації виконували на пікселях із полів, які не було використано в тренувальному наборі.

Детальний журнал (log) валідації:

```

('Accuracy for', 'Decision Tree', 'is', 0.5916666666666667)
('Precision for', 'Decision Tree', 'is', 0.56321839080459768)
('Recall for', 'Decision Tree', 'is', 0.8166666666666666)
('F1 score for', 'Decision Tree', 'is', 0.6666666666666652)
('confusion_matrix for', 'Decision Tree', 'is', array([[220, 380],
[110, 490]]), '\n')
('Accuracy for', 'Random Forest', 'is', 0.6324999999999999)
('Precision for', 'Random Forest', 'is', 0.58054711246200608)
('Recall for', 'Random Forest', 'is', 0.9549999999999999)
('F1 score for', 'Random Forest', 'is', 0.7221172022684309)
('confusion_matrix for', 'Random Forest', 'is', array([[186, 414],
[ 27, 573]]), '\n')
('Accuracy for', 'AdaBoost', 'is', 0.6025000000000000)
('Precision for', 'AdaBoost', 'is', 0.56825749167591566)
('Recall for', 'AdaBoost', 'is', 0.8533333333333333)
('F1 score for', 'AdaBoost', 'is', 0.68221185876082613)
('confusion_matrix for', 'AdaBoost', 'is', array([[211, 389],
[ 88, 512]]), '\n')
('Accuracy for', 'Gradboosting', 'is', 0.6683333333333333)
('Precision for', 'Gradboosting', 'is', 0.60390946502057619)
('Recall for', 'Gradboosting', 'is', 0.9783333333333333)
('F1 score for', 'Gradboosting', 'is', 0.7468193384223919)
('confusion_matrix for', 'Gradboosting', 'is', array([[215, 385],
[ 13, 587]]), '\n')
('Accuracy for', 'Decision Tree', 'is', 0.5333333333333333)
('Precision for', 'Decision Tree', 'is', 0.52493765586034913)
('Recall for', 'Decision Tree', 'is', 0.7016666666666666)
('F1 score for', 'Decision Tree', 'is', 0.6005706134094152)
('confusion_matrix for', 'Decision Tree', 'is', array([[219, 381],
[179, 421]]), '\n')
('Accuracy for', 'Random Forest', 'is', 0.6241666666666666)
('Precision for', 'Random Forest', 'is', 0.57784743991640541)
('Recall for', 'Random Forest', 'is', 0.9216666666666666)
('F1 score for', 'Random Forest', 'is', 0.71034039820166983)
('confusion_matrix for', 'Random Forest', 'is', array([[196, 404],
[ 47, 553]]), '\n')
('Accuracy for', 'Random Forest1', 'is', 0.6391666666666666)
('Precision for', 'Random Forest1', 'is', 0.58546571136131009)
('Recall for', 'Random Forest1', 'is', 0.9533333333333333)
('F1 score for', 'Random Forest1', 'is', 0.72542802790107785)
('confusion_matrix for', 'Random Forest1', 'is', array([[195, 405],
[ 28, 572]]), '\n')
('Accuracy for', 'Random Forest2', 'is', 0.6516666666666666)
('Precision for', 'Random Forest2', 'is', 0.59266802443991851)
('Recall for', 'Random Forest2', 'is', 0.9699999999999999)
('F1 score for', 'Random Forest2', 'is', 0.73577749683944371)
('confusion_matrix for', 'Random Forest2', 'is', array([[200, 400],
[ 18, 582]]), '\n')
('Accuracy for', 'AdaBoost', 'is', 0.5258333333333333)
('Precision for', 'AdaBoost', 'is', 0.51964512040557664)
('Recall for', 'AdaBoost', 'is', 0.6833333333333333)
('F1 score for', 'AdaBoost', 'is', 0.59035277177825773)
('confusion_matrix for', 'AdaBoost', 'is', array([[221, 379],
[190, 410]]), '\n')
('Accuracy for', 'Gradboosting', 'is', 0.7491666666666667)
('Precision for', 'Gradboosting', 'is', 0.592173017507724)
('Recall for', 'Gradboosting', 'is', 0.8583333333333333)
('F1 score for', 'Gradboosting', 'is', 0.73201782304264806)
('confusion_matrix for', 'Gradboosting', 'is', array([[304, 296],
[125, 475]]), '\n')
('Accuracy for', 'Gradboosting1', 'is', 0.7633333333333333)
('Precision for', 'Gradboosting1', 'is', 0.68040983606557374)
('Recall for', 'Gradboosting1', 'is', 0.7966666666666666)
('F1 score for', 'Gradboosting1', 'is', 0.72365482233502533)
('confusion_matrix for', 'Gradboosting1', 'is', array([[310, 290],
[114, 486]]), '\n')
('Accuracy for', 'Gradboosting2', 'is', 0.6783333333333333)
('Precision for', 'Gradboosting2', 'is', 0.61053719008264462)
('Recall for', 'Gradboosting2', 'is', 0.9849999999999999)
('F1 score for', 'Gradboosting2', 'is', 0.75382653061224492)
('confusion_matrix for', 'Gradboosting2', 'is', array([[223, 377],
[ 9, 591]]), '\n')

```

Висновки.

Результати досліджень ефективності використання методів глибокого навчання для виявлення полів технічних культур за допомогою аналізу супутникових зображень показали, що з двох основних підходів для виявлення полів за допомогою супутникових зображень і ШІ більш перспективним є перший підхід (на основі глибинного навчання та контрольованої сегментації). Він є більш точним і структурованим для розв'язання задачі, а також має високу продуктивність за умов наявності великого позначеного набору даних.

Другий підхід, заснований на пороговій агрегації, є менш точним, оскільки використано

узагальнені порогові значення й історичні дані, що не завжди відповідають реальним умовам. Крім того, він може містити випадкові об'єкти, що впливають на якість сегментації.

Зважаючи на переваги та недоліки обох методів, підхід на основі глибинного навчання більш ефективний, оскільки забезпечує точніше виділення полів і має більший потенціал для розширення і удосконалення.

Аналіз початкової гіпотези показав, що найуспішніші результати в класифікації полів були отримані за допомогою алгоритмів градієнтного посилення, досягнувши F1 - оцінки 0,75, з високою чутливістю, але нижчою точністю. Також дослідження показали важливість добре позначеного

набору даних, історичних даних і подальшого вдосконалення методів обробки зображень для досягнення оптимальних результатів.

Список використаних джерел

1. What is computer vision? British Machine Vision Association (BMVA). 2016. (дата звернення: 10.11.2022).
2. Demush R., Hacker Noon. A Brief History of Computer Vision (and Convolutional Neural Networks). February 27, 2019. URL: <https://hackernoon.com/a-brief-history-of-computer-vision-and-convolutional-neural-networks-8fe8aacc79f3> (дата звернення: 18.09.2024).
3. Linda G. Shapiro, George C. Stockman. Computer Vision, 1st Edition. February 2. 2001.
4. Holdsworth J., Scapicchio M. What is deep learning? International Business Machines Corporation (IBM). June, 17. 2024. URL: <https://www.ibm.com/topics/deep-learning>.
5. Long J., Shelhamer E., Darrel T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. UC Berkeley. 2015.
6. Yao Wei, Zeng Zhigang, Lian Cheng, Tang Huiming. Pixel-wise regression using U-Net and its application on pansharpening. October, 24. 2018.
7. Kaiming He Georgia Gkioxari Piotr Dollar Ross Girshick. Mask R-CNN. Facebook AI Research (FAIR). January, 24. 2018.
8. Mark Everingham, Luc van Gool, Chris Williams, John Winn, Andrew Zisserman. The PASCAL VOC project. 2014. URL: <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/> (дата звернення: 06.05.2023).
9. Deng J., Berg A., Satheesh S., Su H., Khosla A. and Fei-Fei L. ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition 2012 (ILSVRC2012). URL: <http://www.image-net.org/challenges/LSVRC/2012/>.
10. Krizhevsky A., Sutskever I. and Hinton G. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. NIPS, 2012.
11. Szegedy C., Toshev A. and Erhan D. Deep neural networks for object detection. NIPS, 2013.

Determining the efficiency of using deep learning methods to detect fields of industrial crops using satellite image analysis

Abstract. The article describes the analysis and research of computer vision techniques used for satellite imagery recognition. The research highlights that convolutional neural networks (CNNs), UNet, and Mask R-CNNs are the most effective models for pixel-wise segmentation of satellite images. These models help extract the areas corresponding to crop fields from raw

satellite pictures. Another method described involves classification using RGB images or different spectral bands, relying on transfer learning from other image domains like ImageNet. This approach, however, is less effective due to limited historical data and the complexity of accurately classifying small field areas. The initial hypothesis was that crop fields can be differentiated by the pixel values of spectral images and the normalized difference vegetation index (NDVI), which reflects vegetation health. The most successful results in classifying the fields came from gradient boosting algorithms, achieving an F1 score of 0.75, with high recall but lower precision.

Keywords: computer vision, image recognition, convolutional neural networks (CNN), image segmentation, transfer learning.

Бриксін Володимир, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-8036-8811. Scopus Author ID: 57195837705.

Зарицький Андрій, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: azarytskyy@gmail.com.

Bryksin Volodymyr, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-8036-8811. Scopus Author ID: 57195837705.

Zarytskyy Andriy, PhD Student of the Department of Information Technologies, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: azarytskyy@gmail.com.

¹БЕРЕСТОВ І.В. канд. техн. наук., доцент, ¹КОЛІСНИК А.В., канд. техн. наук., доцент, ¹ПЕСТРЕМЕНКО-СКРИПКА О.С., канд. техн. наук., доцент, ¹ШПЕК Т.В. аспірант, ¹МИКИТАСЬ О.-М.С., аспірант

¹Український державний університет залізничного транспорту

Аналіз сучасних підходів до управління логістичними процесами на основі прогнозування надходження контейнеропотоків до логістичних хабів

Анотація. Для удосконалення технології обробки контейнерів на контейнерних терміналах або логістичних хабах в Україні було проаналізовано причини та тривалість простой вантажів на прикордонних переходах, що прямують залізничним транспортом, також було визначено найбільш розповсюджену номенклатуру вантажів, що перетинає кордон. Накопичення на переходах великих обсягів вантажів, що перевозяться залізницею та їх тривале очікування відправлення через кордон України свідчать про недостатню ефективність координації перевезень. В якості вирішення проблеми було запропоновано впровадження прогнозованої моделі надходження вантажів у контейнерах до логістичного хабу, яку в подальшому можливо впровадити в інформаційно-керуючі системи, що діють сьогодні. Дана модель забезпечить накопичення потрібної кількості контейнерів на логістичному хабі для подальшого транспортування залізницею через прикордонний пункт. Це призведе до зменшення непродуктивних простой, що можуть виникати під час транспортування вантажу, зокрема залізницею, зменшенню ризиків виникнення непередбачених ситуацій за рахунок можливості чіткого планування перевезень тим самим зменшення додаткових витрат та уникненню черг на прикордонних переходах.

Ключові слова: контейнерні перевезення, ризики, нейронна мережа, комірки LSTM, інтенсивність потоку, логістичний хаб.

Вступ.

Логістичні хаби є важливими елементами сучасних вантажних перевезень. Їхнє значення зростає в умовах інтенсивного розвитку міжнародної торгівлі та глобалізації, оскільки вони об'єднують різні види транспорту та забезпечують координацію складних процесів постачання. Вони дозволяють скоротити час перевантажень і мінімізувати витрати, що виникають при переміщенні товарів між різними транспортними засобами. Використання сучасних технологій, таких як автоматизація та цифрові платформи управління, допомагає оптимізувати процеси сортування, зберігання та розподілу вантажів. Дані в реальному часі дозволяють хабам адаптуватися до змін попиту та забезпечувати точність постачань. Логістичні центри впроваджують сучасні системи моніторингу, контролю доступу та управління ризиками, що сприяє збереженню вантажів і дотриманню стандартів міжнародної торгівлі.

Хаби адаптуються до змін у глобальних ланцюгах постачання, підтримуючи ефективне управління потоками незалежно від обсягів вантажів.

Особливу увагу в дослідженні приділено участі залізничного транспорту як невід'ємної складової вантажних перевезень у логістичних хабах. Залізниця залишається одним із найбільш економічно ефективних та екологічно чистих видів транспорту, що робить її стратегічно важливою для розвитку логістичних центрів. Взаємодія між залізничним транспортом та іншими видами перевезень на базі логістичних хабів дозволить використанню більш ефективних технологій з транспортування вантажів на різні відстані, знижуючи витрати та час доставки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вирішенням проблем пов'язаних з організації транспортування вантажів у контейнерах за участю залізниці в умовах міжнародного сполучення при взаємодії різних видів транспорту займалися як закордонні та вітчизняні вчені такі як Ломотько Д.В., Прохорченко А.В., Ковальов А.О., Запара В.М., Примащенко Г.О. і ін. В [2] підкреслено,

© БЕРЕСТОВ І.В., КОЛІСНИК А.В., ПЕСТРЕМЕНКО-СКРИПКА О.С., ШПЕК Т.В., МИКИТАСЬ О.-М.С. 2025

що логістичні хаби мають ключове значення в транспортних процесах, оскільки саме в цих точках відбувається концентрація та групування товарних потоків. Водночас транспортно-логістичні вузли, такі як місця розташування експедиторських компаній або термінали комбінованих перевезень, рідко інтегруються в моделювання попиту на вантажні перевезення та майже не охоплюються емпіричними дослідженнями. В [3] розглядається моделювання попиту на вантажні перевезення двома підходами: на основі товарних потоків і на основі поїздок транспортних засобів. Аналізуються характеристики розподілу довжини рейсів (РДП), виражені в тоннах — відповідно до вимог моделювання за обсягами перевезених товарів, а також у кількості рейсів транспортних засобів — згідно з підходом моделювання на основі поїздок. В [4] Зазначено, що представлена імітаційна модель з агентними принципами, заснована на логістичних підходах, здатна значно оптимізувати технологічний процес роботи залізничного вузла. За рахунок цієї моделі поїзний диспетчер отримує актуальні дані про стан і завантаженість кожного елемента керуючої системи, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо його використання. Результати моделювання відображаються через автоматизоване робоче місце (АРМ) поїзного диспетчера, виконуючи функції системи підтримки прийняття рішень.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою даного дослідження є удосконалення технології контейнерних перевезень на основі прогнозування їх надходження при взаємодії логістичних хабів та прикордонних переходів і впровадження нових модулів в мережі середовища інформаційно-керуючої системи.

Виклад основного матеріалу.

Технологія обробки контейнерів на контейнерних терміналах або логістичних хабах, де формуються контейнерні або вантажні поїзди, впливає на рівень логістичних витрат, що в свою чергу є складовою вартості транспортування вантажів у контейнерах. Одним із способів зменшення вартості такого виду перевезень є зменшення непродуктивних простоїв, зокрема і на логістичних

хабах. Як відомо, найбільші логістичні хаби, такі як Роттердам, Валенсія і інші оснащені програмним забезпеченням для прогнозування надходження контейнерів від вантажовідправників. Це дозволяє оптимально сформувати контейнерні або вантажні поїзди для подальшого транспортування з урахуванням черг на прикордонних станціях.

Для удосконалення технології обробки контейнерів на контейнерних терміналах або логістичних хабах в Україні було проаналізовано затримки вантажів на прикордонних переходах, що прямують залізничним транспортом, також було визначено найбільш розповсюджену номенклатуру вантажів, що перетинає кордон (рис. 1.1). Українсько-румунські та молдовські прикордонні переходи демонструють суттєве скорочення обсягів залізничних перевезень за десять місяців 2024 року. Загальний обсяг вантажів, перевезених через румунські переходи, становить 2,8 млн тонн, що на 27% менше порівняно з аналогічним періодом 2023 року. Згідно статистичних даних через перехід Вадул-Сірет, на кінець 2024 року, в черзі на обробку перебували 334 вагони, з них 137 — із лісовими вантажами, 61 — із цементом, 36 — із зерном, 36 — із контейнерами. Впродовж 2024 року, перехід Дяково — Халмеу демонструє перехід 467,3 тис. тонн (-31%) вантажу через кордон. В черзі очікуванні знаходилось 111 вагонів, з яких 62 — із цементом, 19 з металургійною продукцією, 30 із жмихами [1].

У 2024 році перевезення через молдовські прикордонні переходи склали 1,9 млн тонн, що на 32% менше, ніж за аналогічний період минулого року. Основними вантажами, що перетинають молдовський кордон, є зернові (517,1 тис. тонн), будівельні матеріали (377,5 тис. тонн) та нафтопродукти (91 тис. тонн).

Ключові залізничні переходи та середня добова кількість переданих вагонів:

Рені — Джурджулешти — 19 вагонів/добу; Серпнєве 1 — Басарабська — 10 вагонів/добу; Могилів-Подільський — Велчинець — 18 вагонів/добу; Кучурган — Новосавицьке — 8 вагонів/добу; Сокиряни — Окниця — 11 вагонів/добу. Статистичні дані наведено на рис.1.

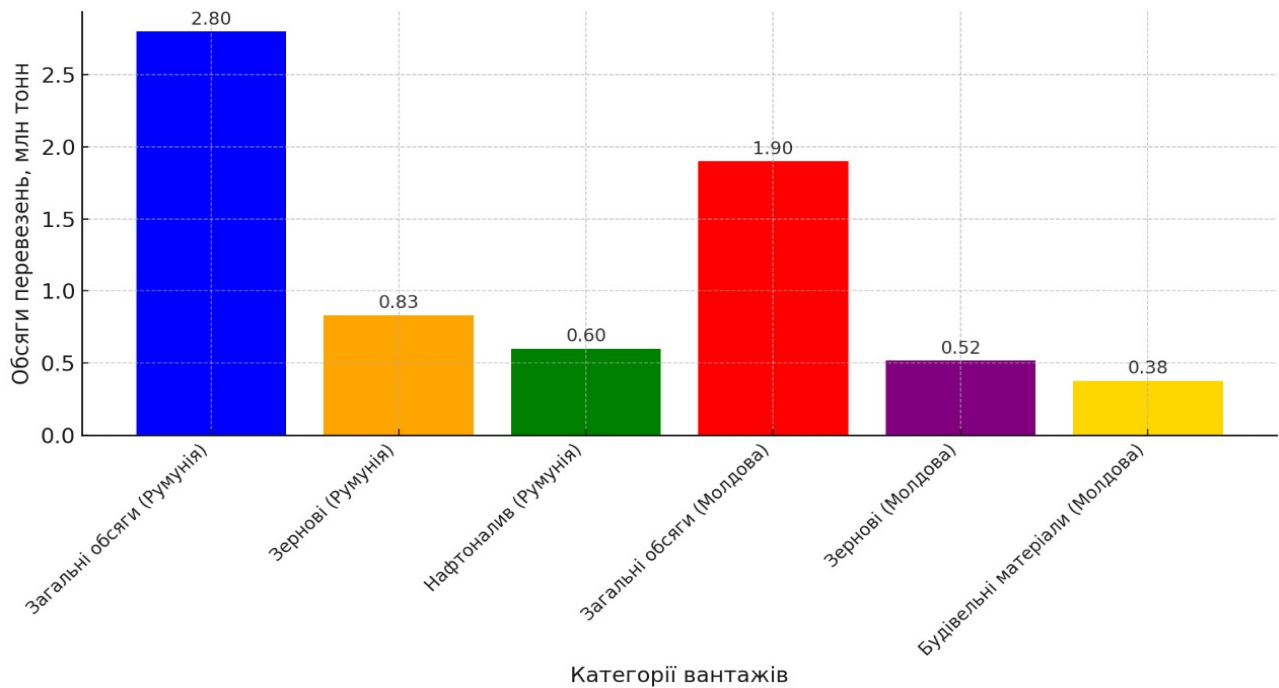


Рисунок 1 – Діаграма, що демонструє обсяги перетину кордону вантажами через румунські та молдовські переходи за 2024 рік

Аналіз статистичних даних щодо перевалки вантажів через українсько-угорські прикордонні переходи свідчить про тенденцію до зменшення їх обсягів.

Через перехід Чоп – Захонь було передано 589 вагонів із середньодобовою передачею 54 вагони, з яких 541 вагон – це зернові вантажі (49 вагонів на добу). За місяць загальний обсяг перевезень зріс на 8 вагонів. Через перехід Батьово – Еперешке загалом передано 792 вагони (за добу – 72), з них 55 вагонів із зерновими вантажами (5 вагонів на добу). Водночас спостерігається незначне зменшення перевалки зернових – на 2 вагони за місяць (рис.2).

На сьогоднішній день через перехід Чоп – Захонь не проходить жодного вагону з території України. Через перехід Батьово – Еперешке було перевезено 458 вагонів, 212 із них залізничною сировиною (ЗРС), 48 із металами, 28 із зерновими і 47 із контейнерами.

Наведені дані вказують на дисбаланс у функціонуванні переходів та підкреслюють потенціал для оптимізації логістичних процесів, зокрема щодо перевезення зернових вантажів.

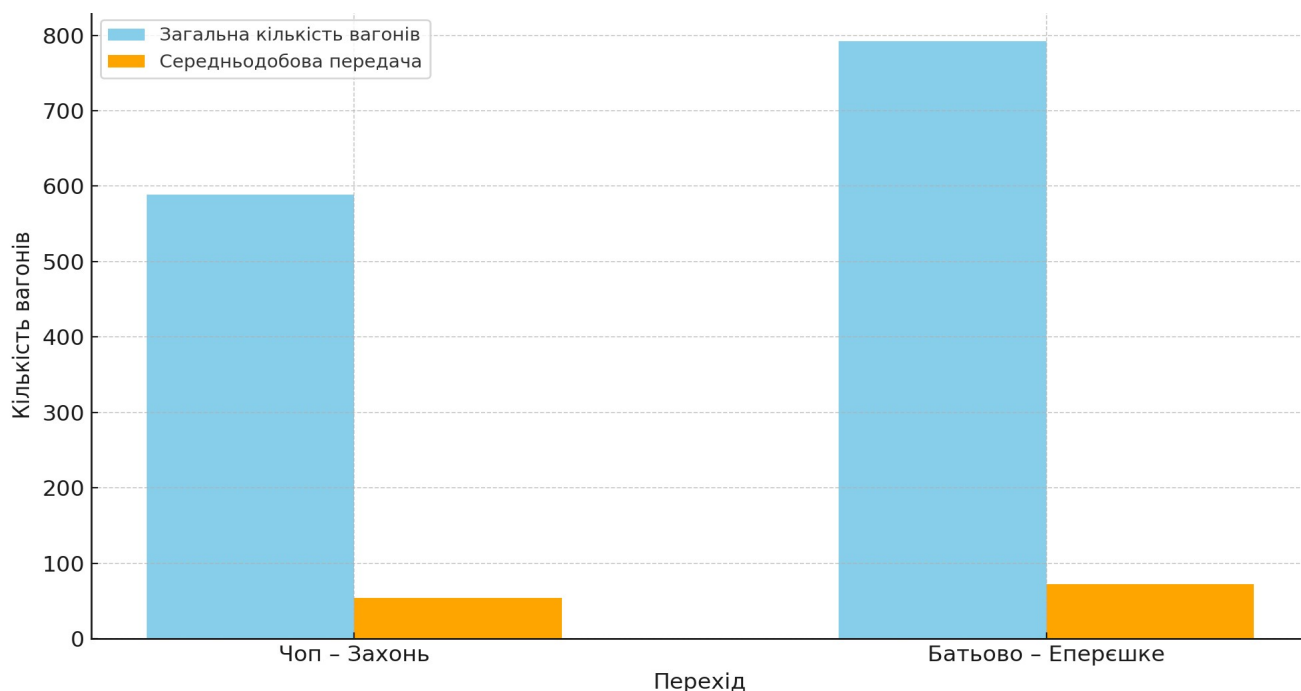


Рисунок 2 - Діаграма розподілу обсягів вантажів перевезених через українсько-угорські прикордонні переходи за 2024 рік

Показники вантажоперевезень через словацькі прикордонні переходи за 10 місяців 2024 року свідчать про зниження обсягів, хоча черги на кордоні залишаються (рис.3). Загальний обсяг перевезень – 9,2 млн тонн, що на 13% менше, ніж у минулому році. Найбільш розповсюджені види вантажів, що перевезені через кордон: руда – 7,2 млн тонн (-14%) зернові вантажі – 727,2 тис. тонн (-35%), чорний метал (чормет) – 126,2 тис. тонн (-30%). Перехід Чоп – Чірна-над-Тисою демонструє загальний обсяг – 5,1 млн тонн (-12%), середньодобова передача – 275 вагонів (+11 за місяць). Перевезення за видами вантажів: руда – 154 вагони/добу, зернові – 38 вагонів/добу. Очікування обробки чекали 646 вагонів (467 із рудою, 54 з металургійною продукцією, 22 із зерном, 45 контейнерів).

Перехід Ужгород – Матевце: загальний обсяг: 3,5 млн тонн (-14%), середньодобова передача: 101 вагон (-64 за місяць). Перевезення: руда: 95

вагонів/доба (↓ з 154). В очікуванні обробки залишається 227 вагонів (226 із рудою) [1].

Робота прикордонних переходів демонструє зниження обсягів перевезень, зумовлене конвенціями, логістичними обмеженнями та змінами попиту. У подальшому необхідна координація між логістичними хабами, куди надходять контейнери від вантажовідправників, прикордонними переходами для оптимізації руху вантажів для усунення затримок. Відомо, що одним із варіантів оптимізації руху вантажів, зокрема залізницею, є використання контейнерів. Обсяги транспортування вантажів у контейнерах збільшуються з кожним роком у всьому світі. Тому, в даній статті пропонується модель прогнозування надходження вантажів до логістичних хабів саме у контейнерах. Першочерговою задачею постає дослідження надходження контейнеропотоків від вантажовідправників до логістичних хабів.

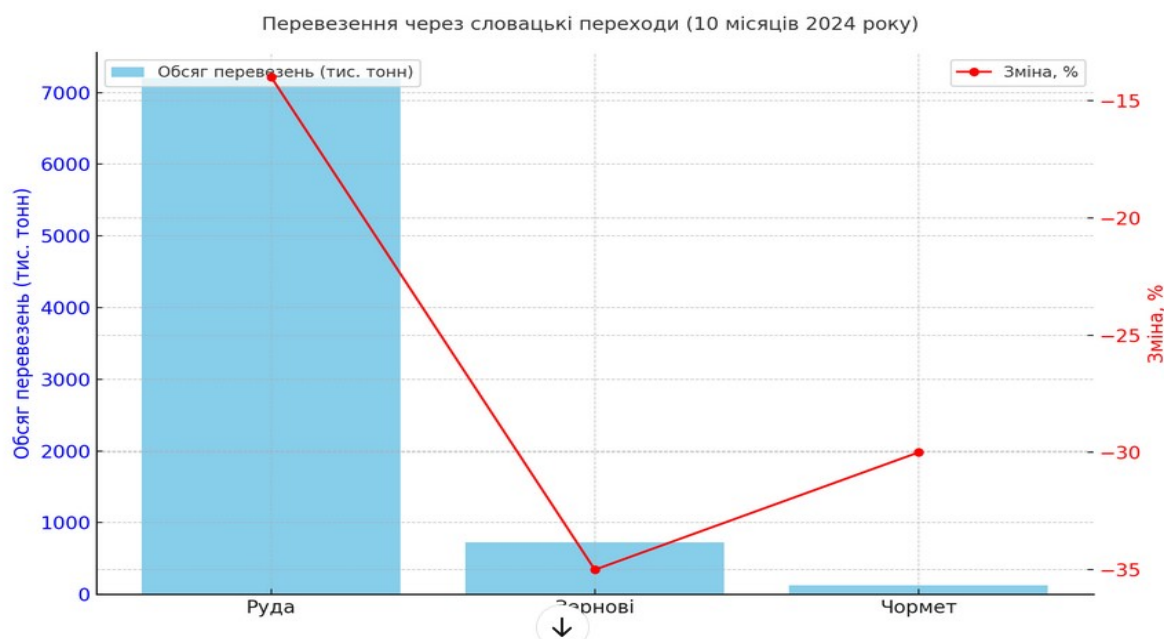


Рисунок 3- Обсяги перевезень вантажів через словацькі прикордонні переходи за 2024 рік, (тис.тонн)

Як показують дослідження [7, 10], основною характеристикою контейнеропотоків є функції інтенсивності. Таким чином для забезпечення можливості прийняття рішень на майбутній плановий період необхідна наявність прогнозу інтенсивностей потоків надходження контейнерів до логістичних хабів. Здійснення прогнозу потребує наявності даних за певний період у минулому. Для побудови прогнозної моделі надходження контейнеропотоків до логістичних хабів використовувались статистичні дані одного з найбільшого хабу Європи.

Надходження контейнерів до логістичного хабу від вантажовідправників розглядається у вигляді часових рядів так як контейнеропотоки, представлені у вигляді нестационарних випадкових потоків, інтенсивність потоку яких може представляти собою часову залежність. Часові ряди – зібраний в певні

моменти часу статистичний матеріал що містить значення одного чи декількох параметрів. Аналізуючи різні моделі прогнозування часових рядів, виявилось, що існує доволі значна їх кількість, які наведено на рисунку 1.

Для прогнозування часових рядів з найефективніших сучасних нейронних структур розглядаються рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема модулі *довготривалої короткострокової пам'яті (LSTM, англ. Long Short- Term Memory)*. LSTM використовується для завдань, де важливо не втратити дані на тривалих інтервалах часу, таких як: фінансове прогнозування, аналіз кліматичних даних, обробка мовлення, системи прогнозування попиту (рис.4). Цей підхід дозволяє забезпечити точніше прогнозування завдяки здатності збереження та використання даних [9].



Рисунок 4 - Класифікація основних типів моделей для прогнозування часових рядів

Запропонована модель була реалізована у середовищі Matlab, яка дозволяє спрогнозувати інтенсивності надходження контейнеропотоків.

Архітектура цієї моделі показана на рис. 5. Мережа LSTM містить 40 комірок у шарі довгої короткочасної пам'яті (LSTM), 80 нейронів у повнозв'язаному шарі та 20 нейронів у декодуючому шарі.

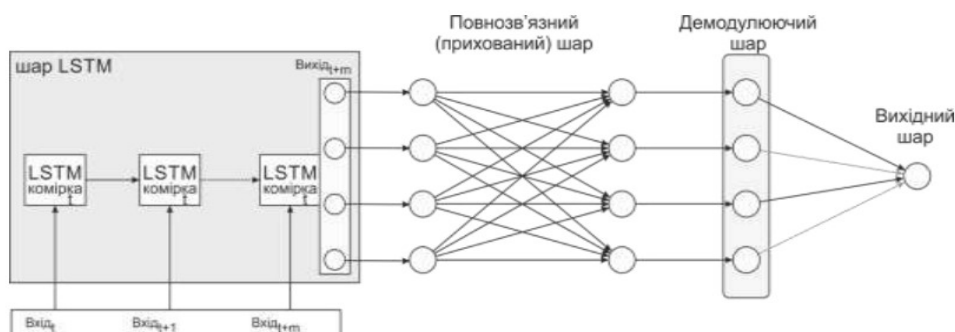


Рисунок 5 – Структура моделі на базі рекурентної нейронної мережі для передбачення прибуття контейнерів до логістичних хабів

Було проаналізовано дані надходження контейнерів до логістичного хабу за 2023 рік, які в подальшому було використано для навчання нейронної мережі. На рисунку 6 наведено фрагмент цієї послідовності, який відображає фактичну інтенсивність прибуття контейнерів, порівняно з результатом прогнозу, отриманим за допомогою побудованої нейронної мережі. Аналіз результатів

моделі прогнозування оцінено за методом середньої абсолютної відсоткової похибки (MAPE). Відомо, що вищезазначений метод оцінки, що базується на аналізі сегментів площин, усуває обмеження застосування MAPE, пов'язане із неможливістю використання його у випадку наявності нульових значень у ряді даних. За результатами розрахунків, цей показник не перевищує 6%.

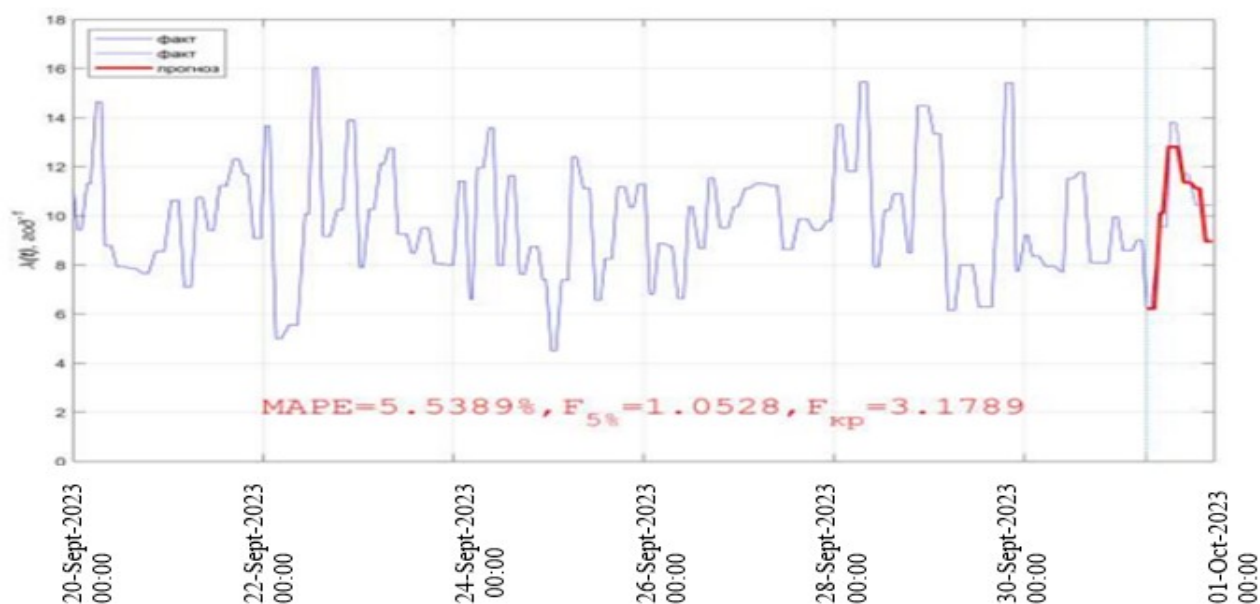


Рисунок 6- Відображення порівняння результату прогнозування інтенсивності надходження контейнерів до логістичного хабу з реальними даними

Ураховуючи той факт, що характер прогнозової залежності дуже близько відповідає залежності, що відповідає фактичним даним, можна констатувати високий рівень точності розробленої прогнозової моделі. Результати прогнозування та представлені дисперсії відповідних вибірок даних, які використовуються для розрахунку критерію Фішера наведено у таблиці 1.

Наведений вище метод представлення функції інтенсивності, застосований для аналізу фактичних і прогнозних даних, є ефективним для моделювання параметрів розріджених потоків та виявлення часових залежностей між подіями. Однак цей підхід не дозволяє безпосередньо зіставити дані часового ряду з рівномірно розподіленими точками на часовій осі. З іншого боку, при управлінні процесом накопичення контейнерів важливішим є не сам

характер функції інтенсивності потоку, а її інтегральна функція. У цьому контексті точнішим підходом буде порівняння площ під графіками прогнозованої та фактичної інтенсивностей у відповідних часових інтервалах.

В дослідженні розглядалися прогнозні функції інтенсивності потоків надходження контейнерів до логістичного хабу різної кратності, а саме 1, 2, 3 за добу. Для адекватного та зручного представлення залежностей було використано функцію модулю, що дасть змогу автоматизувати та уніфікувати процес їх обчислення. Дані функції інтенсивності є інтегрованими на всій області визначення.

Таблиця 1- Кількість реальних подій та на основі прогнозу, абсолютна та відносна різниця між ними

Інтервал	Прогнозні дані	Фактичні дані	Абсолютна різниця	Відносна різниця, %
1	10,3274	10,5961	-0,2687	-2,5357
2	12,6187	13,6148	-0,9961	-7,31606
3	17,3417	15,8482	1,4963	9,423484
4	20,8968	20,2424	0,6544	3,23257
5	21,1476	22,4480	-1,3004	-5,79306
6	19,4234	20,0724	-0,6490	-3,23342
7	18,8135	19,0663	-0,2529	-1,32626
8	18,5022	17,5311	0,9711	5,539139
9	16,8367	17,3224	-0,4857	-2,80399
10	14,8651	17,3224	-2,4573	-14,1855
σ^2	12,4629	11,8376	1,33701	45,4063

$F_{5\%}$	1,0528
$F_{кр}$	3,1789
MAPE	5,5389 %

З урахуванням представлення потоку контейнерів з різними кратностями, залежність ймовірності накопичення мінімальної кількості

контейнерів від кількості контейнерів та тривалості часового проміжку можна представити як [7,8]

$$p(N([t_0, \tau]) \geq n) = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^{\tau} \lambda_{\Sigma}(t) dt\right) \sum_{i=1}^{x(s,k)} \prod_{j=1, \Sigma q_{ij} < k, q_{ij} \in \Gamma}^s \sum_{r=0}^{k_j-1} \frac{\left(k_j \int_{t_0}^{\tau} \lambda_j(t) dt\right)^{k_j((k_j-1)q_{ij}+1+r)}}{((k_j-1)q_{ij}+1+r)!}, \quad (1)$$

де n – кількість контейнерів, які надійдуть до логістичного хабу; $[t_0, \tau]$ – границі планового періоду відповідно – моменти початку і завершення; $\lambda_j(t)$ – інтенсивність потоку контейнерів кратності j , як функція від часу; q_{ij} – кількість подій потоку кратності j на часовому інтервалі $[t_0, \tau]$ у i -му варіанті реалізації розвитку подій; s – максимальна кратність потоку, яка розглядається на логістичному хабі; $x(s, k)$ – множина можливих варіантів розвитку подій за заданих параметрів s та k , коли під випадком розуміється одна з можливих реалізацій потоку, що характеризується множиною $q_{i1}, q_{i2}, q_{i3} \dots q_{ij}$; потоку, яка розглядається на даному логістичному хабі; $\int_{t_0}^{\tau} \lambda_{\Sigma}(t) dt = \lambda(t)$ – «ведуча

функція потоку» [7,8], тобто кумулятивна сумарна інтенсивність потоків всіх кратностей як функція від часу.

Рішенням даної задачі є продемонстрована на рисунку 7 залежність ймовірності накопичення щонайменше n контейнерів від кількості контейнерів та тривалості часового інтервалу на логістичних хабах

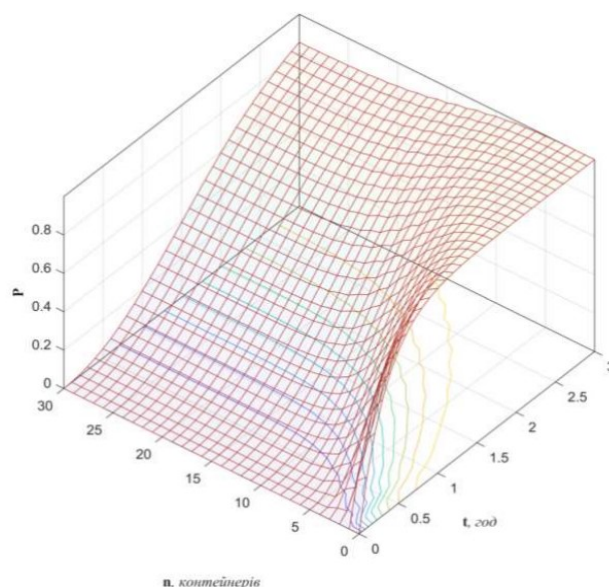


Рисунок 7 – Прогнозований результат накопичення n контейнерів на логістичному хабі залежно від часового інтервалу та ймовірності надходження контейнерів від вантажовідправників

Запропонований метод прогнозування надходження вантажів у контейнерах до логістичних хабів з урахуванням організації роботи прикордонних переходів надасть змогу чіткої координації роботи всіх учасників процесу в умовах міжнародних перевезень при взаємодії різних видів транспорту. Це призведе до зменшення непродуктивних простоїв, що можуть виникати під час транспортування вантажу, зокрема залізницею, зменшенню ризиків виникнення непередбачених ситуацій за рахунок можливості чіткого планування перевезень тим самим зменшення додаткових витрат.

Висновки.

В даній статті проаналізовано роботу прикордонних переходів в сучасних умовах. Черги

на переходах і тривалий час очікування повного завантаження складів вказують на недостатню ефективність координації перевезень. В якості вирішення проблеми було запропоновано впровадження прогнозованої моделі надходження вантажів у контейнерах до логістичного хабу, яку в подальшому можливо впровадити в інформаційно-керуючі системи, що діють на сьогодні. Дана модель забезпечить накопичення потрібної кількості контейнерів на логістичному хабі для подальшого транспортування залізницею через прикордонний пункт. Це призведе до зменшення непродуктивних простоїв, що можуть виникати під час транспортування вантажу, зокрема залізницею, зменшення ризиків виникнення непередбачених ситуацій за рахунок можливості чіткого планування перевезень тим самим зменшення додаткових витрат та уникнення черг на прикордонних переходах.

Список використаних джерел

1. Накопичення парку в очікуванні передачі через прикордонні переходи. [Електронний ресурс].-Режим доступу: <https://ukrvantage.com/>
2. Stefan Huber, Daniela Luft, Jens Klauenberg, Carina Kehrt. Integration of Transport Logistics Hubs in Freight Transport Demand Modelling. European Transport Research Review 7(4). 2014. P.1-21.
3. Alla Grechan, Artem Bezuglyi, Olena Parfentieva and other. Fulfillment of sustainable development goals by the example of the transport and logistics sector. Financial and credit activity: problems of theory and practice Volume 4 (45), 2022.P.191-201.
4. José Holguín-Veras, Ellen Thorson. Trip Length Distributions in Commodity-Based and Trip-Based Freight Demand Modeling: Investigation of Relationships. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1707(1).2000.P. 37-48.
5. Примаченко Г. Основи організації логістики у мультимодальних транспортних системах за участю залізничного транспорту [Електронний ресурс]. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/transport2-76-107.pdf> (дата звернення 15.11.2024)
6. Запара В.М., Запара Я.В. Гергель І.Г. Удосконалення технології роботи залізничного вузла шляхом застосування сучасних логістичних підходів. URL: https://www.researchgate.net/publication/329761982_UDOSKONALENNA_TEHNOLOGII_ROBOTI_ZALIZNICNOGO_VUZLA_SLAHOM_ZASTOSUVANNA_SUCASNIH_LOGISTICNIH_PIDHODIV
7. Колісник А. В. Формування автоматизованої технології транспортування контейнерів залізницею на основі теорії випадкових потоків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.10.20. Харків. 2020. 195 с.
8. LONG SHORT-TERM MEMORY. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf>
9. Прогнозування та аналіз часових рядів. [Електронний ресурс]. URL: <https://ir.stu.cn.ua/jspui/bitstream/123456789/16992/1/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%BD%D0%BE%D0%B7%D1%83%D0%B2.%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%85%20%D1%80%D1%8F%D0%B4%D1%96%D0%B2.pdf>
10. Kutsenko M., Kolisnyk A., Kameniev O., Shchablykina O., Yaruta A. Research of process of receipt of container flows at railway terminal stations in the conditions of intermodal transportations. AIP Publishing. [Електронний ресурс]. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/020006/2893741/Research-of-process-of-receipt-of-container-flows?redirectedFrom=fulltext>

Berestov I.V., PhD (Tech.), Associate Professor
Kolisnyk A. V., PhD (Tech.), Associate Professor,
Pestremenko-Skrypka O. S. PhD (Tech.), Associate Professor
Shpek T. V. PhD student, Mykytas O.-M.S. PhD student, Ukrainian State University of Railway Transport, department of railway stations and units.
Analysis of modern approaches to logistics process management based on forecasting the flow of container flows to logistics hubs.
To improve the technology of container handling at container terminals or logistics hubs in Ukraine, delays in cargo at border crossings for rail transport were analyzed, and the most common types of cargo crossing the border were identified. Queues at border crossings and long waits for full loading of warehouses indicate a lack of efficiency in transportation coordination. The study pays special attention to the participation of rail transport as an integral part of freight transportation in logistics hubs. The railroad remains one of the most cost-effective and environmentally friendly modes of transportation, which makes it strategically important for the development of logistics centers. Interaction between rail transport and other modes of transportation based on logistics hubs will allow the use of more efficient technologies for the transportation of goods over different distances, reducing costs and delivery time. As a solution to the problem, it was proposed to introduce a predictive model of the arrival of cargo in containers to the logistics hub, which can be further implemented in the information management systems that are in place today. This model will ensure the accumulation of the required number of containers at the logistics hub for further transportation by rail through the border crossing. This will lead to a reduction in unproductive downtime that can occur during cargo transportation, in particular by rail, a reduction in the risk of unforeseen situations due to the possibility of clear planning of transportation, thereby reducing additional costs and avoiding queues at border crossings. The proposed method of forecasting the arrival of cargo in containers to logistics hubs, taking into account the organization of border crossings, will allow

for clear coordination of the work of all participants in the process in the conditions of international transportation in the interaction of different modes of transport.

Key words: container transportation, risks, neural network, LSTM cells, flow intensity, logistics hub.

Берестов Ігор В'ячеславович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0002-1209-6885], e-mail berestov@kart.edu.ua

Berestov Igor, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID [0000-0002-1209-6885], e-mail berestov@kart.edu.ua

Колісник Аліна Володимирівна - кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0001-5038-0230], tel. 093-734-41-20, e-mail kolisnuk@kart.edu.ua

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport ORCID ID [0000-0001-5038-0230], tel. 093-734-41-20, e-mail kolisnuk@kart.edu.ua

Пестременко-Скрипка Оксана Сергіївна - кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту ORCID ID [0000-0001-5335-5399], e-mail pestremenko@kart.edu.ua

Pestremenko-Skrypka Oksana, PhD (Tech.), Senior Lecturer, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport, ORCID ID [0000-0001-5335-5399], e-mail pestremenko@kart.edu.ua

Шпек Тарас Володимирович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів.

Taras Shpek PhD student at the Department of Railway Stations and units.

Микитась Олександр-Михайло Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою.

Mykytas Oleksandr-Mykhailo Sergiyovych Postgraduate student of the Department of Operations Management.

Редакційна колегія

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

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

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

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

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

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

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

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

Ловська А. О. д.т.н., проф. УкрДУЗТ

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

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

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

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

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

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

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

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

Thierry Horsin, Enseignant chercheur au
CNAM (PU);

Юрай Герліці, доктор інженерії,
професор, почесний професор, завідувач
кафедри Транспорт та підйомно-
транспортна техніка
Жилінського університету (Словаччина)

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

© 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

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

Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de l'ISSN, 75002 PARIS, France.

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

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

Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 6 від 1 липня 2025 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 Фейсбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 318.
Тел.: (057) 730-19-37, 730-10-82. E-mail: ndch.ukrsurt@ukr.net

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

Підписано до друку 01.07.2025 р. Формат 60x84 ¹/₈.

Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №

Наклад 50 прим. Ціна договірна.

Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.

Видавець та виготовлювач

Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, площа Фейсбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.