



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

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

№1 2026 р.

1(164)' 2026
**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

**INFORMACIJSNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI**

Зміст – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту

ПАРХОМЕНКО Л. О., КОЛІСНИК А. В., ШПЕК Т. В.
**Удосконалення автоматизованої системи
управління вантажними перевезеннями залізницею
в умовах інтермодальних перевезень під час
воєнного стану**
..... 3

СЛІЗАРЕНКО А. О.
**Організація мереж поїзного радіозв'язку в умовах
гірської місцевості та в тунелях залізниць**
..... 10

КАРГІН А. О., КУЗЬМЕНКО Р. С.
**Модель імовірно-нечіткого контролера зі
змінною структурою в контурі нечіткого управління
автономним роботом**
.....17

ШЕЛЕХАНЬ Г. І., ПОГОРЄЛОВ В. В.
**Підвищення ефективності взаємодії об'єктів
припортової станції та морського порту**
.....29

МУРИГІНА Н.О., МАЛШЕВСЬКА А.С., БУГАЄЦЬ Н.В., ТЕРТИЧНИЙ В.В. Критерії для призначення ремонту з оновлення верхньої будови безстикової колії	39
КОВАЛЬОВ В. М. Дослідження впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії тягових двигунів постійного струму	43
ЛОМОТЬКО Д. В., АРСЕНЕНКО Д. В., ГРУНИК І. С., ІЛЬЧИШИН В. М., ЛОМОТЬКО М. Д. Формування стохастичної моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій	50
О.Yu.BARKOVSKA Model and algorithm for neural network-based gaze fixation duration determination for dynamic content adaptation in inclusive learning	62
ЗМІЙ С. О., ХІСМАТУЛІН В. Ш., СІРОКЛИН І. М., СОСУНОВ О. О. Оцінювання потенціалу впровадження альтернативних джерел енергії для залізничної автоматики в Україні	72
NERUBATSKYI V. P. Features of the use of brushless motors in traction rolling stock	82
ЛЯШЕНКО В.М. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ОПТИМІЗОВАНИХ ТРАСЕКТОРІЙ РУХУ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ	106

ПАРХОМЕНКО Л. О., д-р техн. наук, професор,
КОЛІСНИК А. В., канд. техн. наук., доцент,
ШПЕК Т. В. аспірант,
Український державний університет залізничного транспорту

Удосконалення автоматизованої системи управління вантажними перевезеннями залізницею в умовах інтермодальних перевезень під час воєнного стану

Анотація. Запропонована технологія дає змогу оптимізувати використання залізничного рухомого складу та зменшити час простою контейнерів на станціях і в логістичних хабах. Удосконалена автоматизована система керування вантажними перевезеннями Української залізниці (АСК ВП УЗ-С) через впровадження прогновної моделі забезпечує скорочення часу та витрат на транспортування вантажів завдяки раціональному розподілу часових ресурсів, технічних потужностей і людського фактора в системі підтримки ухвалення рішень, а також зниження ризиків під час транспортування вантажів. У статті запропоновано удосконалену структуру автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями за взаємодії залізничного та морського транспорту з логістичним хабом. Розраховано економічну доцільність упровадження запропонованої автоматизованої технології.

Ключові слова: залізничні перевезення, контейнери, логістичні хаби, автоматизована система керування вантажними перевезеннями Української залізниці, система підтримки ухвалення рішень, оптимізація, ефективність, воєнний стан.

Постановка проблеми.

В умовах війни кожна ланка ринку перевезень зазнала суттєвих змін. Обсяги та номенклатура перевезень різними видами транспорту на сьогодні відрізняються від довоєнного періоду. Деякі види перевезень на території України майже повністю припинили своє функціонування, зокрема повітряний транспорт. Морський транспорт частково втратив свою дієздатність на початку війни, однак згодом його роботу було майже повністю відновлено. Щодо залізничного транспорту, то, як і інші види перевезень, він зазнав значного негативного впливу воєнних дій. Змінилися маршрути транспортування вантажів і пасажирів, технології перевезень, їхні обсяги та номенклатура.

Водночас основними напрямками удосконалення процесу вантажних перевезень залізничним транспортом залишаються зменшення часу та витрат на транспортування через раціональний розподіл часових ресурсів, технічних

потужностей і людського фактора в системах підтримки ухвалення рішень (СППР), а також зниження ризиків під час транспортування вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

За останні роки провідні вітчизняні та зарубіжні вчені зробили вагомий внесок у розвиток автоматизованих систем організації вантажних перевезень різними видами транспорту, зокрема залізничним.

У статті [1] запропоновано впровадження автоматизованої системи «Надзвичайна ситуація», що відкриває можливості для застосування ризик-орієнтованих технологій. У роботі [2] розглянуто питання розроблення автоматизованої технології організації контейнерних перевезень залізничним транспортом в інтермодальних логістичних ланцюгах на основі теорії точкових процесів. У роботі [3] запропоновано розширення функціональних можливостей підсистеми «e.Портал УЗ-Карго» автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Української залізниці, що допоможе розраховувати і аналізувати дані, які виникають під час роботи з претензіями та позовами у внутрішніх модулях підсистеми. У роботі [4] розроблено прогнозну модель надходження контейнерних вантажів до логістичного хабу, яку в подальшому запропоновано впровадити в інформаційно-керуючу систему. Разом із тим питання адаптації таких технологій до умов функціонування залізничного транспорту в період воєнного стану потребують подальших досліджень.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Аналіз останніх наукових публікацій і сучасних тенденцій розвитку організації інтермодальних вантажних перевезень за участі залізничного транспорту свідчить про необхідність удосконалення автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Української залізниці через впровадження прогновної моделі.

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Її застосування забезпечить зменшення часу та витрат на транспортування завдяки раціональному розподілу часових ресурсів, технічних потужностей і людського фактора в системах підтримки ухвалення рішень (СППР), а також зниження ризиків під час транспортування вантажів. У статті запропоновано удосконалену структуру автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями за взаємодії залізничного та морського транспорту з логістичним хабом. Розраховано економічну доцільність упровадження запропонованої автоматизованої технології.

Формулювання мети. Формування структури взаємодії автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Української залізниці з використанням системи підтримки ухвалення рішень на автоматизованих робочих місцях оперативного персоналу та автоматизованому робочому місці менеджера з логістики.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відомо, що майже всі процеси, які відбуваються під час організації перевезень залізницею, зокрема вантажних, є автоматизованими. На залізницях України функціонує автоматизована система керування вантажними перевезеннями – АСК ВП УЗ-Є. Для оптимізації та підвищення ефективності залізничних контейнерних перевезень запропоновано інтегрувати новий модуль до АСК ВП УЗ-Є.

Цей модуль, оснащений СППР, буде доступний через АРМ основних оперативних працівників (ДНЦ, ДСП, ДНЦОВ, ДСЦ) і менеджера з логістики. Координація логістичної інфраструктури (хабів, станцій, перевізників) із використанням системного підходу допоможе уникнути простоїв вантажів. Це підвищить ефективність перевезень, знизить загальні витрати на транспортування контейнерів, а також скоротить терміни доставлення вантажів.

Перевезення вантажів у контейнерах займають велику частку в загальних обсягах вантажних перевезень. Статистичні дані за останні роки свідчать про зростання обсягів контейнерних перевезень. Зокрема, залізницею було перевезено 258 185 TEU, що на 28 % більше, ніж у 2023 році. Основну частину цих перевезень становлять зернові (46 %), чорні метали (20 %), макуха (9 %), олія (8 %), цукор (4 %) і синтетичні смоли (3,7 %).

За вісім місяців 2025 року контейнерні перевезення продемонстрували стійкість, встановивши новий рекорд за обсягами в морських портах — понад 134 тис. TEU, попри загальне скорочення вантажних перевезень на 11,3 % порівняно з 2024 роком. Водночас обсяг контейнерів, перевезених залізницею, зменшився на 15 %. Тому з метою переорієнтації вантажовідправників на використання залізничного транспорту запропоновано удосконалити перевізний процес через впровадження нового модуля в АСК ВП УЗ-Є.

Пропонують інтегрувати прогнозну модель надходження контейнерів до АСК ВП УЗ-Є для автоматизованого управління вагонами та перевезеннями.

Етапи впровадження складатимуться:

- з аналізу даних, що передбачає збір історичної інформації про вантажопотоки, затримки і терміни доставлення контейнерів;

- визначення параметрів впливу (сезонність, тип вантажу, маршрути);

- інтеграції прогнозної моделі до АСК ВП УЗ-Є з метою автоматичного формування планів роботи хабів і забезпечення взаємодії з модулями розподілу ресурсів (вагонів, локомотивів, складських потужностей);

- тестування та оптимізації, що включає запуск моделі на окремих ділянках для валідації точності прогнозів і корегування алгоритмів відповідно до отриманих результатів.

Масштабування системи можливе через впровадження прогнозної моделі для всієї мережі логістичних хабів, запропонованої в роботі [4]. Це дасть змогу підвищити точність планування, оскільки завдяки прогнозуванню зменшується ймовірність перевантаження або недостатнього використання ресурсів, а також скоротити час очікування контейнерів завдяки автоматизованому розподілу ресурсів і прискоренню обробки вантажів. Впровадження такої моделі стане вагомим кроком у цифровій трансформації залізничної логістики та сприятиме підвищенню конкурентоспроможності АТ «Укрзалізниця» на ринку вантажних перевезень.

Удосконалена структура АСК ВП УЗ-Є в умовах перевезення контейнерів наведена на рис. 1.

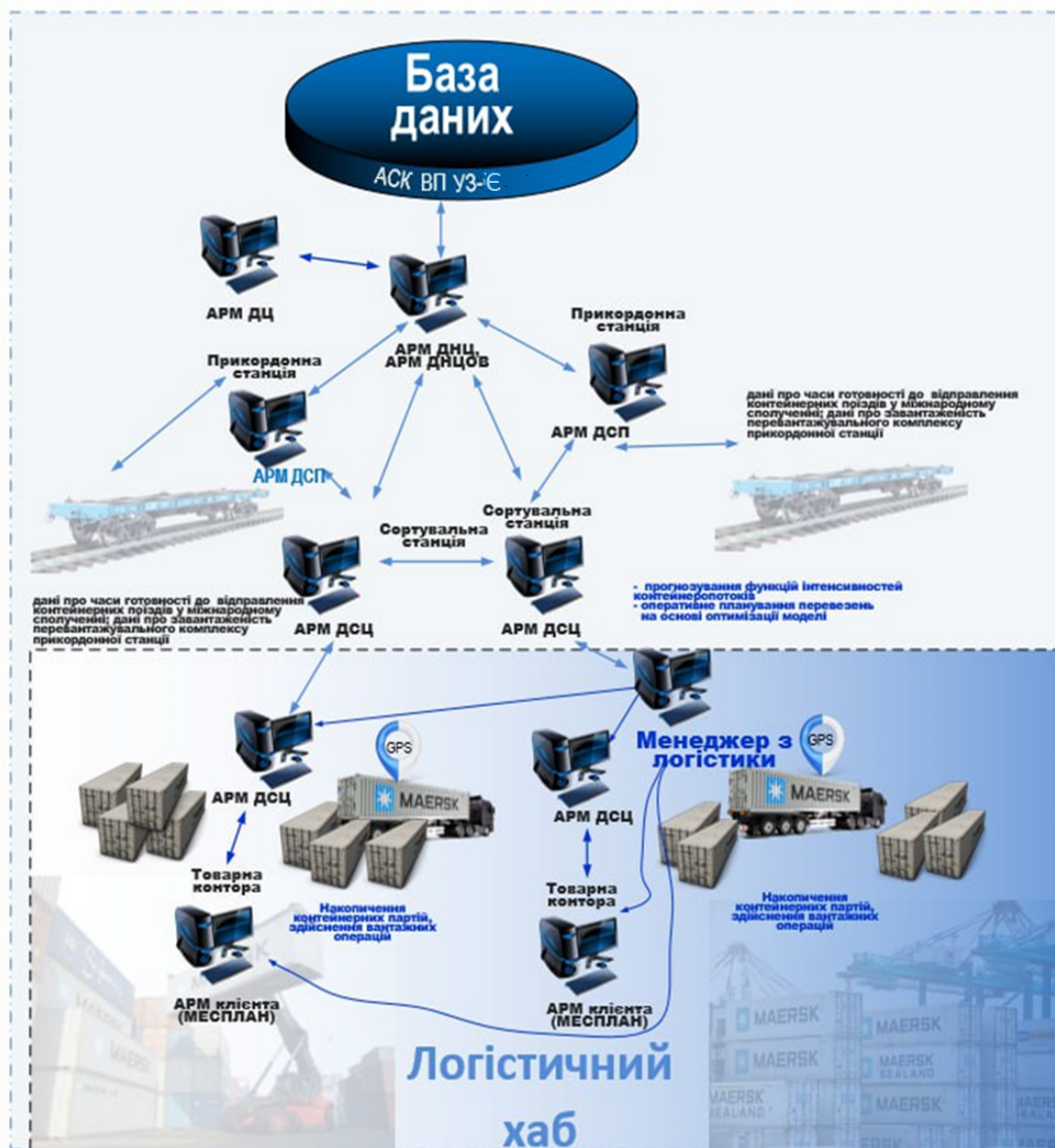


Рис. 1. Удосконалена АСК ВП УЗ-Є в умовах інтермодальних перевезень

Запропоновано встановити удосконалений взаємозв'язок між АРМ ДСЦ, АРМ ДСП сортувальної та прикордонної станції, а також логістичним хабом, до якого надходять контейнери від вантажовідправників, через систему АСК ВП УЗ-Є для забезпечення інформаційного обміну між учасниками перевізного процесу. З автоматизованих робочих місць (АРМ ДСЦ, АРМ ДСП) до бази даних АСК ВП УЗ-Є надходить інформація про кількість накопичених контейнерів на станціях, їх наявність, підхід поїздів до станції та склад поїздів. На основі цієї інформації, а також даних про завантаженість перевантажувального комплексу на прикордонній станції, кількість контейнерів на логістичному хабі та заявки транспортно-логістичних компаній через систему АС Месплан і план формування вантажних

поїздів, програмний модуль розв'язує складну задачу стохастичної оптимізації.

Після оброблення всієї інформації та прогнозування надходження контейнерів від вантажовідправників (із застосуванням методів нейронних мереж) визначають оптимальний час завершення накопичення контейнерної партії та раціональний варіант її відправлення. СПІР інтегровано до автоматизованих робочих місць чергових по станції (АРМ ДСП), маневрових диспетчерів (АРМ ДСЦ) прикордонних станцій, а також працівника логістичного хабу, підключеного до Єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Укрзалізниці.

Дані, отримані в результаті моделювання, каналами зв'язку передають на погодження до АРМ

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

ДНЦ та АРМ головного диспетчера УЗ. Скорегований і погоджений план перевезень надсилають на автоматизовані робочі місця лінійних підрозділів (станцій). Працівники станцій у день причеплення вагонів до поїздів доповідають ДНЦ і центрам управління вагонами операторських компаній про виконання плану перевезень.

Також запропоновано створити інформаційний зв'язок між менеджером із логістики та АСК ВП УЗ-Є, а також частково впровадити на його АРМ систему підтримки ухвалення рішень, що допоможе вирішувати такі завдання, як прогнозування надходження контейнерних партій, оперативне планування та доведення планів до виконавців. Менеджер володітиме актуальною інформацією про місцезнаходження та накопичення контейнерів, а також про поїзд, у складі якого заплановано їх транспортування.

База даних АСК ВП УЗ-Є інтегрована з прикордонними станціями та логістичним хабом для забезпечення обміну інформацією, яку накопичують, зберігають і використовують для прогнозування надходження контейнерних партій від вантажовідправників.

Отже, на основі сформованої автоматизованої технології удосконалено інформаційно-керуючу систему (ІКС) у складі АСК ВП УЗ-Є через інтеграцію до АРМ оперативних працівників додаткових функціональних можливостей.

Як показали результати досліджень, через розбіжність даних про надходження та накопичення контейнерів на термінальних станціях або логістичних хабах, а також неузгодженість інформації в загальній системі виникають простої контейнерів і рухомого складу. Запропонована технологія допоможе скоротити тривалість використання контейнерів за рахунок зменшення непродуктивних простоїв на логістичних хабах приблизно на $\Delta_{\kappa} = 8\%$, а також час використання фітінгових платформ на $\Delta_{nl} = 8\%$, що сприятиме зниженню собівартості транспортування контейнерів залізницею в міжнародному сполученні.

Економічний результат від впровадження такої технології становитиме

$$E = \left(\frac{\Delta_{\kappa}}{100} K_{\kappa} t \cdot e_{\kappa-2} + \frac{\Delta_{nl}}{100} K_{nl} t \cdot e_{\kappa-2} \right) T, \quad (1)$$

де K_{κ} – середня кількість контейнерів, які очікують операції подавання на перевантажувальний комплекс прикордонної станції та початку перевантаження, приймаємо 20-футові контейнери TEU;

K_{nl} – середня кількість фітінгових платформ завантажених контейнерами, що знаходяться на логістичному хабі в очікуванні вивантаження;

$e_{\kappa-2}$ – витратна ставка за одну вагоно-годину;

$e_{\kappa-2}$ – витратна ставка за одну контейнеро-годину простою [5, 6];

t – сумарна тривалість робочих змін,
 $t = 24$ год;

T – звітний період розрахунку показника,
 $T = 365$ діб.

Тоді з урахуванням дисконтування, яке необхідне для врахування зміни вартості грошей із приведенням грошового оцінювання результату до першого року, який прийнято за розрахунковий, сумарний результат визначають так [5]:

$$O = \alpha_i \sum_{i=1}^n O_i. \quad (2)$$

Капітальні витрати в перший рік впровадження складаються з вартості розроблення програмного забезпечення та підготовки системи до експлуатації (пусконаладжувальних робіт) і становитимуть

$C_K = e_{ПЗ} = 500000$ у.о. Поточні витрати виникають унаслідок необхідності здійснення технічної підтримки та переналагодження програмного забезпечення і становлять $\delta_{ПЗ} = 5\%$ на рік від його вартості.

Для визначення економічного ефекту також необхідно врахувати витрати для реалізації проекту [5]:

$$C = \sum_{i=1}^n \left((C_i^K + C_i^П) \alpha_i \right), \quad (3)$$

де C_i^K – капітальні витрати на i -му році;

$C_i^П$ – поточні витрати на i -му році;

α_i – коефіцієнт дисконтування на i -му році;

n – кількість років.

Результати і витрати різних років приводять до першого року життєвого циклу проекту, тобто визначають у теперішній вартості грошей дисконтуванням. Економічний ефект від реалізації проекту визначають так [5]:

$$E = \sum_{i=1}^n \left((O_i - (C_i^K + C_i^P)) \alpha_i \right). \quad (4)$$

У таблиці наведено розрахунок економічного ефекту за роками, а на рис. 2 — динаміку зміни витрат, економічного результату, економічного ефекту під час експлуатації автоматизованої системи.

Розрахунок економічного ефекту

Показник	Рік									
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Одночасні витрати, млн умов. од.	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Результати, млн умов. од.	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Поточні витрати, млн умов. од.	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Економічний ефект, млн умов. од.	1,615	2,115	2,115	2,115	2,115	2,115	2,115	2,115	2,115	2,115
Коефіцієнт дисконтування	1	0,813	0,661	0,538	0,437	0,356	0,289	0,235	0,191	0,156
Дисконтований економічний ефект, млн умов. од.	1,62	1,72	1,4	1,14	0,92	0,75	0,611	0,5	0,41	0,33
Дисконтований економічний ефект нарастаючим підсумком, млн умов. од.	1,62	3,34	4,74	5,88	6,8	7,55	8,16	8,66	9,07	9,4

Впровадження нового модуля використання запропонованої технології на автоматизованій технології управління вантажопотоками в міжнародному сполученні дасть змогу скоротити невиробничі прості контейнерів і фітінгових платформ. Економічний ефект від використання запропонованої технології на підприємстві протягом 10 років становитиме 9,4 млн умов. од.

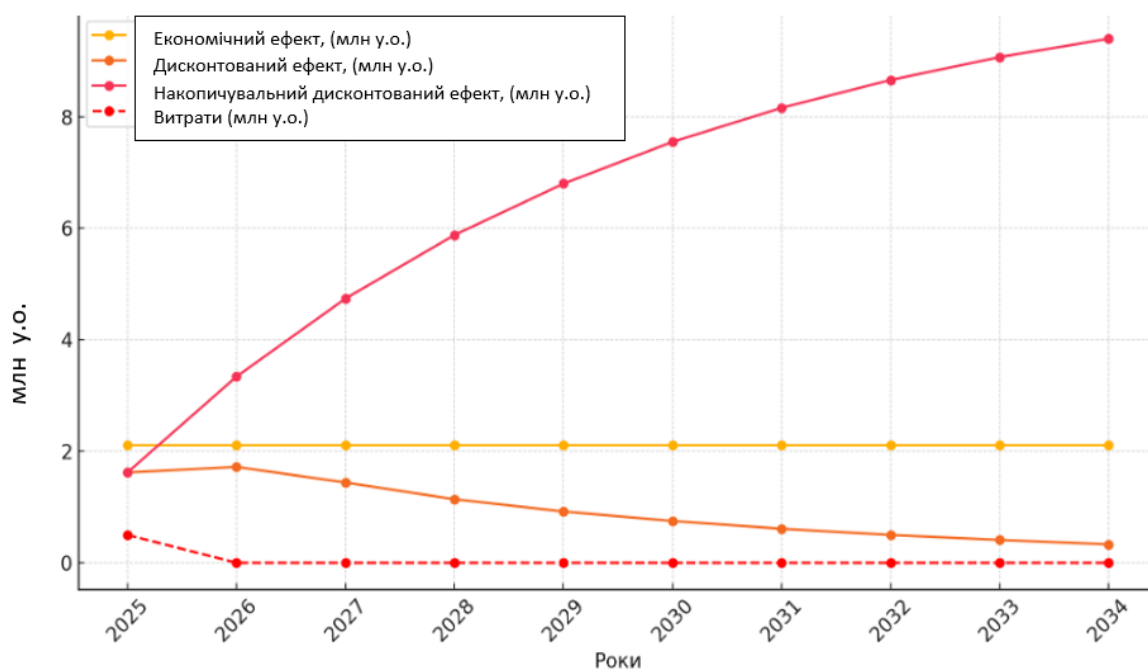


Рис. 2. Графічне подання економічного ефекту від впровадження запропонованої технології

Висновки з дослідження і перспективи

Реалізація запропонованої автоматизованої технології дасть змогу оптимізувати використання залізничного рухомого складу і скоротити тривалість простою контейнерів на станціях. Це сприятиме мінімізації затримок під час транспортування вантажів в умовах воєнного стану, прискоренню міжнародних перевезень і зниженню їхньої вартості.

Головними завданнями запропонованої технології є прогнозування обсягів контейнерних перевезень, а також визначення оптимальної кількості контейнерів, що надходять до конкретного логістичного хабу в певний період, на основі використання історичних даних і сучасних алгоритмів Big Data і машинного навчання. Крім того, передбачена оптимізація маршрутів через вибір найраціональніших шляхів переміщення контейнерів з урахуванням прогнозованих обсягів надходження. Розрахунки показали, що економічний ефект від використання запропонованої технології на підприємстві протягом 10 років становитиме 9,4 млн умов. од.

Список використаних джерел

1. Гайдук Д. А., Бутко Т. В. Удосконалення автоматизованої системи «Надзвичайна ситуація» у взаємодії з АСК ВП УЗ Є для керування рухом поїздів із використанням системи підтримки прийняття рішень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024 № 2. С. 3-6. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/24025/1/Butko.pdf> (дата звернення: 11.11.2025).
2. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 1 (3 (103)). P. 6-12. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195071> (дата звернення: 11.11.2025).
3. Кулешов В. В., Крячко К. В., Магальяс А. С. Удосконалення інформаційної технології роботи опорної станції при перевезеннях парком різних власників. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10 (41), ч. II. С. 228-232. URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10\(41\)_II/26.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10(41)_II/26.pdf) (дата звернення: 11.11.2025).
4. Аналіз сучасних підходів до управління логістичними процесами на основі прогнозування надходження контейнеропотоків до логістичних хабів / І. В. Берестов, А. В. Колісник, О. С. Пестременко-

Скрипка та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025 № 2. С. 169-177. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/zurnal-2.pdf> (дата звернення: 11.11.2025).

5. Балака Є. І., Зоріна О. І., Колесникова Н. М., Писаревський І. М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.
6. Збірник тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ним послуги. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#n32>.

References

1. Haiduk, D. A., & Butko, T. V. (2024). Udoskonalennia avtomatyzovanoi systemy "Nadzvychaina sytuatsiia" u vzaemodii z ASK VP UZ Ye dlia keruvannia rukhom poizdiv iz vykorystanniam systemy pidtrymky pryiniattia rishen [Improvement of the automated system "Emergency Situation" in interaction with ACS FP UZ E for train traffic control using a decision support system]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (2), 3-6. <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/24025/1/Butko.pdf> [in Ukrainian].
2. Butko, T., Prokhorov, V., Kolisnyk, A., & Parkhomenko, L. (2022). Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(103)), 6-12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195071>
3. Kuleshov, V. V., Kriachko, K. V., & Mahalias, A. S. (2024). Udoskonalennia informatsiinoi tekhnolohii roboty opornoj stantsii pry perevezenniakh parkom riznykh vlasnykiv [Improvement of information technology of the base station operation during transportation by a fleet of different owners]. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), 228-232. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10\(41\)_II/26.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10(41)_II/26.pdf) [in Ukrainian].
4. Berestov, I. V., Kolisnyk, A. V., & Pestremenko-Skrypka, O. S. (2025). Analiz suchasnykh pidkhodiv do upravlinnia lohistychnymy protsesamy na osnovi prohozuvannia nadkhodzhenia konteineropotokiv do lohistychnykh khabiv [Analysis of modern approaches to managing logistics processes based on forecasting the arrival of container flows to logistics

- hubs]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (2), 169-177. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/zhurnal-2.pdf> [in Ukrainian].
5. **Balaka, Ye. I., Zorina, O. I., Kolesnykova, N. M., & Pysarevskiy, I. M. (2005).** *Otsinka ekonomichnoi dotsilnosti investytsii v innovatsiini proekty na transporti* [Assessment of the economic feasibility of investments in innovative projects in transport]. UkrDAZT [in Ukrainian].
 6. *Zbirnyk taryfiv na perevezennia vantazhiv zaliznychnym transportom u mezhakh Ukrainy ta poviazani z nym posluhy* [Collection of tariffs for the carriage of goods by rail within Ukraine and related services]. (n.d.). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#n32> [in Ukrainian].

ASC VP UZ-E IN THE CONTEXT OF INTERMODAL TRANSPORTATION INVOLVING RAILWAYS DURING MARTIAL LAW

¹PARKHOMENKO L. O., Doctor of Technical Sciences, Professor,

¹KOLISNYK A. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

¹SHPEK T. V., Postgraduate Student,

¹Ukrainian State University of Railway Transport

Abstract. *In wartime, every link in the transport market has undergone significant changes. The volumes and range of transport by various modes of transport today differ from pre-war times. Some modes of transport have almost completely ceased to exist in Ukraine, such as air transport. Maritime transport partially ceased to function at the beginning of the war, then almost completely recovered. As with other modes of transport, military action has had an irreversible impact on rail transport. The routes for transporting both cargo and passengers, as well as the technologies, volumes, and range of services, have changed. However, the main issues in improving the process of freight transport by rail remain the reduction of transport time and costs through the rational allocation of time, technical capacities, and the human factor in decision support systems (DSS), as well as the reduction of risks during freight transport. The proposed decision support system is integrated into the automated workstation of the station duty officer (ARM DSP), the shunting dispatcher (ARM DSC) at border stations, as well as the logistics hub employee connected to the Unified Automated Freight Transportation Management System of Ukrzaliznytsia. The implementation of this technology will optimize the use of rolling stock and reduce container downtime at stations. It will also help minimize cargo delays during martial law, speeding up international shipments and reducing their cost. The key tasks of the model are to forecast container volumes, with the model predicting the number*

of containers that will arrive at a specific hub during a specific period, and to use historical data and modern Big Data and machine learning algorithms. Routes will also be optimized by ensuring the best routes for container movement, taking into account projected arrivals. The economic effect of using the proposed technology at the enterprise over 10 years will amount to UAH 9.4 million.

Keywords: rail transport, containers, logistics hubs, ASK VP UZ-E, decision support system (DSS), optimization, efficiency, martial law.

Пархоменко Лариса Олексіївна, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: [0000-0003-1647-7746]. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Шпек Тарас Володимирович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0009-0009-6204-4619>

Parkhomenko Larysa, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operational Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: [0000-0003-1647-7746]. E-mail: parhomenko@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.

Taras Shpek, PhD student at the Department of Railway Stations and Units, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0009-0009-6204-4619>

Стаття надійшла 02.12.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.01.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

УДК 656.254.16

DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i1.357549>

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

Організація мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості та в тунелях залізниць

Розроблено пропозиції з організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку в гірських районах різної складності та в тунелях залізниць.

В умовах гірської місцевості суттєво ускладнені умови поширення радіохвиль УКХ діапазонів, що призводить до зростання згасання сигналів і підвищення глибини флуктуацій.

Канали УКХ діапазону в тунелях можна організувати тільки з використанням випромінюючих кабелів, які не тільки забезпечують передавання електромагнітної енергії вздовж тунелю, а і сприяють випромінюванню електромагнітної енергії в зоні прокладання. Запропоновано організацію дводіапазонних систем гектометрового та метрового діапазонів із використанням єдиної випромінюючої мережі.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, організація каналів у гірській місцевості, використання каналів із випромінюючими кабелями в тунелях.

Вступ

Питання організації і проектування мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості на ділянках із залізничними тунелями є актуальними. Значна частина ліній Львівської залізниці розташована в Карпатському регіоні, для якого характерні складні умови поширення радіохвиль і наявність залізничних тунелів значної протяжності. Найбільший із них, Бескидський, має довжину 1765 м. Значення європейських коридорів зростає через плани будівництва європейської колії 1435 см на ділянках Чоп-Ужгород, Львів-Мостиська та ін.

Поїзний радіозв'язок організовано вздовж ділянок залізниць для зв'язку машиністів поїзних локомотивів із черговими по станціях і поїзним диспетчером. За ПТЕ, на кожній ділянці залізниці мають бути організовані лінійні мережі в гектометровому та зонні мережі поїзного радіозв'язку в метровому діапазоні радіохвиль [1, 2], причому лінійний канал поїзного радіозв'язку організований уздовж всієї диспетчерської ділянки в гектометровому діапазоні радіохвиль.

На жаль, чинні рекомендації ITU-R не містять чітких рекомендацій з інженерних розрахунків каналів поїзного радіозв'язку в гірських умовах.

Одна з фундаментальних рекомендацій ITU-R P.1546 є статистичною моделлю поширення радіохвиль, яка розроблена для умов середньопересіченої місцевості. У той же час розрахунок поправок на рельєф місцевості ускладнений і неоднозначний [3].

У рекомендації ITU-R P.1406 наведено різні фактори поширення радіохвиль, які впливають на мережі рухомого радіозв'язку [4].

© ЄЛІЗАРЕНКО А. О. 2026

Ці рекомендації не містять конкретних методів з інженерних розрахунків каналів у гірській місцевості, а лише загальні рекомендації.

Водночас відомчі правила розрахунку опрацьовані глибше і допомагають розраховувати канали з урахуванням різних особливостей трас поширення радіохвиль [5].

У гектометровому діапазоні радіохвиль низька ефективність насамперед локомотивних антен, тому для передавання електромагнітної енергії використовують напрямні лінії, що дає змогу сконцентрувати напруженість поля корисного сигналу безпосередньо в зоні проходження колії.

У гірській місцевості суттєво скорочена дальність радіозв'язку в УКХ діапазоні порівняно з каналами на відкритій місцевості. Практично єдиним способом забезпечити організацію УКХ радіоканалів у тунелях залізниць є використання випромінюючих кабелів [6].

Перші наукові публікації з використання випромінюючих кабелів у підземних галереях значної протяжності: залізничних тунелях, рудниках, шахтах, з'явилися на початку 70-х років минулого століття [6, 7]. У подальшому продовжили теоретичні та експериментальні дослідження випромінюючих кабелів [8-10].

Постановка проблеми

Удосконалення методів організації і проектування мереж поїзного радіозв'язку в складних умовах гірської місцевості та в залізничних тунелях.

Основні результати

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

На залізницях України основним каналом поїзного радіозв'язку в лінійних мережах залишається канал, який організований у гектометровому діапазоні на частоті 2,13 МГц [2].

Рельєф місцевості мало впливає на умови передавання електромагнітної енергії у схемах із використанням напрямних ліній.

Для необхідної дальності та якості поїзного радіозв'язку в діапазоні гектометрових хвиль використано напрямні лінії, що каналізують електромагнітну енергію від стаціонарних і локомотивних радіостанцій уздовж залізниці. Передавання електромагнітних сигналів у цьому випадку здійснюється електромагнітними полями індукції, що поширені вздовж напрямних ліній.

На електрифікованих ділянках як напрямні лінії використовують високовольтні проводи повздожнього електропостачання, які підвішені на опорах контактної мережі або спеціально підвішений хвилеводний провід [2].

Передавання високочастотної енергії від стаціонарної радіостанції в напрямні проводи здійснюється підключенням передавача радіостанції до напрямних проводів через розділові конденсатори або за допомогою збуджувального проводу (індуктивний спосіб), що підвішений паралельно напрямним проводам.

Дальність радіозв'язку визначають з урахуванням усіх втрат в елементах тракту передавання сигналів радіозв'язку та мінімально необхідного рівня корисного сигналу.

Для розрахунків ураховують мінімальний рівень корисного сигналу на вході локомотивної радіостанції від 72 дБ на ділянках змінного струму до 50 дБ за автономної тяги.

Згасання різних типів напрямних ліній відрізняється мало і складає в середньому 1,5 - 2 дБ/км, що забезпечує дальність радіозв'язку до 8 км за змінного струму з використанням хвилевідного проводу. Згасання в лінійному тракті з використанням інших типів напрямних проводів буде зростати за рахунок додаткових лінійних пристроїв.

Направні високовольтні лінії не можна прокладати в тунелях безпосередньо і для використання проводів ДПР, які з підходом до тунелю переходять на спеціальні високовольтні опори і обходять тунельну ділянку зверху, а проводи ВЛ в тунелях прокладають високовольтним кабелем.

За наявності тунелів на ділянці для передавання сигналів радіозв'язку підвішують окремий хвилевідний провід. За довжини тунелю до 300 м підвішують однопровідний хвилевід, за більшої

довжини тунелів тип напрямної лінії визначають на основі розрахунків дальності радіозв'язку.

Для однопровідного хвилеводу в тунелі згасання зростає до 12 дБ/км, що скорочує можливу дальність у тунелі до 2 км. Згасання сигналів із використанням двопровідного хвилеводу суттєво менше і складає 1,7 дБ/км.

На перегонах, де є два і більше тунелів, для забезпечення впевненого радіозв'язку необхідно застосовувати двопровідний хвилевід, який проходив би через усі тунелі, щоб виключити багаторазові переходи від однієї напрямної лінії до іншої.

У гірській місцевості суттєво скорочена дальність радіозв'язку в УКХ діапазоні порівняно з каналами на відкритій місцевості. Погіршені умови поширення радіохвиль, збільшені втрати в каналі і зменшена напруженість поля сигналу. Окрім того, зростає глибина просторових флуктуацій. У методиці розрахунку каналів поїзного радіозв'язку ці особливості враховують із використанням відповідних поправкових коефіцієнтів $V_{рел}$ і $V_{місц}$.

У типовій методиці для розрахунку дальності дії каналів поїзного радіозв'язку УКХ діапазону в умовах гірської місцевості необхідно додатково враховувати, окрім $V_{парам}$, виду електротяги, обладнання локомотивів, додаткові коефіцієнти, які враховують особливості гірських трас.

$$E_{2p} = U_{2min} + g_2 + \sum B_{трас} + \sum B_{парам} + \sum B_{імов}, \text{ дБ.} \quad (1)$$

Поправковий коефіцієнт $\sum B_{трас}$ необхідно доповнити коефіцієнтом $V_{рел}$, що вибирають залежно від типу трас, який визначає зростання втрат від параметрів складності траси.

Коефіцієнт $V_{імов}$ враховує глибину флуктуацій за швидких і повільних просторових завмирань сигналів і часові флуктуації. При цьому коефіцієнт $V_{місц}$ дає змогу врахувати зростання флуктуацій внаслідок зміни рельєфу місцевості і залежить від складності траси.

Траси радіозв'язку залежно від рельєфу місцевості поділяють на п'ять типів. Для кожного типу траси визначені відповідні поправкові коефіцієнти, які враховують складність траси.

Усі зазначені в правилах [5] класифікаційні критерії трас радіозв'язку визначають за їхнім профілем, який необхідно будувати за даними топографічних карт у напрямку зв'язку.

Тип траси визначено з урахуванням таких характеристик трас: загальна характеристика місцевості; глибина і довжина закриття траси; відстані від передавача і приймача до перешкоди.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У табл. 1 наведені результати розрахунків для різних типів складності трас за однакових значень інших параметрів каналу, що входять до складу формули (1). Ділянка електрифікована за системою змінного струму. Потужність передавача стаціонарної радіостанції $P = 10$ Вт; висота антени передавача $h_1 = 20$ м; $G_1 = 4$ дБ; погонне згасання фідера $\alpha_{\phi 1} = 0,15$ дБ/м; $l_1 = 20$ м. Висота приймальної антени $h_2 = 5$ м; $G_2 = 0$ дБ; погонне згасання фідера $\alpha_{\phi 2} = 0,15$ дБ/м; $l_2 = 5$ м.

Визначимо дальність радіозв'язку між стаціонарною радіостанцією і радіостанцією магістрального локомотива за різних типів складності трас.

Відомі випромінюючі кабелі з отворами в зовнішньому провіднику (виробники RFS Kabelmetal (Німеччина), корпорація Andrew (США), EUPEN (Бельгія)) [11]. Ще одним типом є триаксальні кабелі pu-TRAC (Times Microwave Systems). Зовнішні екрани триаксального складаються з алюмінієвих стрічок, розділені шаром діелектрика, що спрощує технологію виготовлення [12].

У табл. 2 наведені паспортні параметри випромінюючого кабелю RMC-7/8''EUPEN і триаксального TRC-850 pu-TRAK. Виробники випромінюючих кабелів наводять характеристики кабелів, виміряних на діелектричних опорах, віддалених від поверхонь.

Т

а
б
л
и
ц
я

Основні параметри кабелів

Результати розрахунку дальності радіозв'язку для трас різної складності

Параметр каналу	Результат розрахунку залежно від типу складності траси				
	1	2	3	4	5
$V_{\text{рел}}, \text{дБ}$	3,4	0	-3,4	-6,8	-10,2
$V_{\text{місц}}, \text{дБ}$ для ймовірності 90 %	2	3	4	5	6
Дальність радіозв'язку, км	12,2	10,4	7,2	5,4	3,8

Зі зростанням складності траси суттєво зменшується дальність радіозв'язку від 12,2 км для траси типу 1 до 3,8 км для траси типу 5.

Випромінюючі кабелі є найбільш ефективним засобом організації каналів УКХ діапазону в тунелях залізниць. Випромінюючий кабель забезпечує не тільки передавання електромагнітної енергії, а і її випромінювання в зоні проходження.

Уперше в Україні випромінюючі кабелі були застосовані для проєктування каналів радіозв'язку в метрополітені в м. Харкові. Зараз широко застосовують для організації стільникових систем рухомого радіозв'язку в тунелях метрополітенів.

Використовувана смуга частоти, МГц	RMC-7/8''	TRC-850
Повздожне згасання, дБ/км		
160 МГц	17	18
460 МГц	31	33
900 МГц	44	58
1900 МГц	94	-
Згасання між кабелем і антеною, для надійності по полю 50/95 %		
160 МГц	81/89	74/94
460 МГц	79/87	80/96
900 МГц	69/74	80/96
1900 МГц	67/72	-

У паспортних даних кабелів наведені значення коефіцієнтів згасання та перехідного згасання для деяких дискретних значень частот, які найчастіше використовують у мережах мобільного радіозв'язку 160, 460, 900, 1900 МГц. У технічних характеристиках

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

кабелів наведені середні значення перехідного згасання (50 %) і ті, які не будуть перевищені в 95 % випадків вимірювань, тобто з імовірністю 95 %, що дає змогу врахувати інтерференційні процеси в каналах радіозв'язку.

Перехідне згасання характеризує взаємозв'язок кабелю з навколишнім середовищем і суттєво залежить від умов прокладання, характеристик тунелю, відстані від стінок тунелю. Загальні втрати складають суму цих параметрів, що визначає дальність радіозв'язку.

Експериментальні статистичні результати досліджень повздовжнього згасання та перехідного згасання отримані в умовах реального прокладання в Харківському метрополітені в діапазоні 160 МГц і вперше наведені в роботі [13]. Загалом рекомендовано установлювати випромінюючі кабелі на діелектричних кронштейнах на значній відстані від зводів тунелю. Але в умовах дослідження параметрів у Харківському метрополітені випромінюючий кабель діаметром 7/8 дюйма встановлювали поблизу від стінки тунелю. У роботі показано, що розподіл значень просторових флуктуацій перехідного згасання в реальних умовах прокладання відповідає логарифмічно-нормальному закону флуктуацій напруженості поля для каналів із випромінюючими кабелями в тунелях.

За результатами досліджень, середнє значення $A_{пер}$ в каналі складає 51,4 дБ за середньоквадратичного відхилення $\sigma = 5,96$ дБ на відстані від кабелю 2 м. Саме ці параметри включені в Правила розрахунку і проектування мереж поїзного радіозв'язку в тунелях залізниць.

Випромінюючі кабелі не використовують у гектометровому діапазоні, і паспортні дані для цих частот відсутні. Але дослідження параметрів у цьому діапазоні необхідні для організації лінійних мереж ПРЗ. За цими параметрами можна визначити дальність радіозв'язку в гектометровому діапазоні та УКХ діапазоні на частотах, відведених для залізничного транспорту. Параметри виміряні в реальних умовах експлуатації мереж технологічного радіозв'язку для кабелів із діаметром 7/8 можна використати для реального проектування мереж [8].

Із розташуванням радіостанції в середині тунелю можна забезпечити необхідну дальність радіозв'язку за рахунок використання двоплечової схеми.

На базі наведених паспортних характеристик у табл. 2 визначають середньоквадратичне відхилення перехідного згасання для різних частот. Виходячи з наведених параметрів, можна зазначити, що розрахункові значення середньоквадратичного відхилення просторових флуктуацій для частот 160 МГц складають для кабеля RMC 7/8'' 6,2 дБ. Це підтверджує відповідність структури випромінюваних полів у кабелях обох типів. У триаксимальних кабелях більше згасання, глибина флуктуацій більше та складає 9,7 дБ.

Визначимо дальність радіозв'язку, яка забезпечена в каналах із перспективними системами дециметрового діапазону на частотах 460 і 900 МГц, виходячи з паспортних характеристик кабелів. На більш високих частотах суттєво збільшуються втрати з поширенням сигналів у кабелі.

Тоді результати розрахунків дальності за методикою [8] складуть для частоти 160 МГц 1,7 км.

На більш високих частотах 460 МГц, 900 МГц суттєво зростає згасання в кабелі, хоча середньоквадратичне відхилення коливань флуктуацій випромінюваних полів майже не відрізняється.

Для частоти 460 МГц за аналогічних умов передавання дальність радіозв'язку в тунелі складе 1,1 км, а на частоті 900 МГц – 0,95 км.

На рисунку наведені залежності сумарних втрат зв'язку для різних частот для випромінюючого кабелю RMC 7/8 EUPEN від відстані. Крива $L_{доп}$ визначає максимально допустимі втрати в каналі за однакових енергетичних характеристик мереж. Точка перетину кривих визначає дальність радіозв'язку для надійності радіозв'язку по полю 95 %.

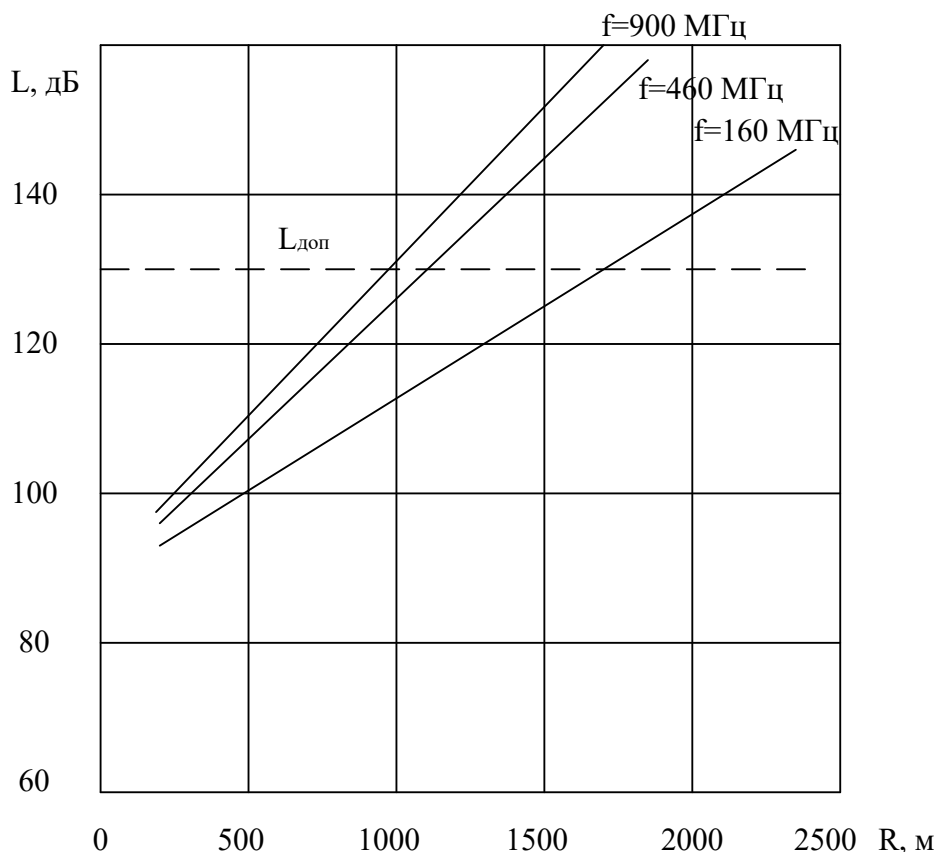


Рис. Визначення дальності радіозв'язку для кабелю RMC 7/8 EUPEN для різних частот

На більш високих частотах сумарні втрати зростають, а реалізована дальність радіозв'язку зменшується. Але навіть на частоті 900 МГц результати становлять прийнятні значення з урахуванням того, що в двоплечій схемі підключення радіостанцій до випромінюючого кабелю дальність радіозв'язку складає подвійну величину.

Висновки

1. Розглянуто методи організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості та в тунелях залізниць.

2. У гірських умовах зростає згасання сигналів і глибина флуктуацій на трасах, що пов'язано зі складним рельєфом місцевості.

3. Отримані в роботі результати можуть бути орієнтиром для організації радіомереж в умовах гірської місцевості.

4. Розраховано дальність радіозв'язку каналів УКХ діапазонів у тунелях залізниць із необхідною надійністю для використання випромінюючого кабелю, що є прийнятною для більшості випадків, навіть у випадках значної довжини тунелів.

Список використаних джерел

1. ЦРБ 0004. Правила технічної експлуатації залізниць України: офіц. вид. Київ: Транспорт України, 2007.
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. Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2020. 57 p.
4. Recommendation ITU-R P.1406-3. Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands. 2015. 17 p.
5. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058 / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
6. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: навч. посіб. / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлизаренко, Н. А. Корольова. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 145 с.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

7. ДБН В.2.3 – 19:2018. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування: Наказ Міністерства регіонального розвитку України від 28.09.2018 р. № 261. Київ, 2018. 129 с.
8. Єлизаренко А. О. Впровадження дводіапазонних мереж технологічного радіозв'язку в тунелях залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 42-47.
9. Gorobets N. N., Lebedev A. S., Yelizarenko A. A. Proceedings of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kyiv, Ukraine). *IEEE Catalog Number CFP*. 2017. 17540. P. 180-182. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7972615/>.
10. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. The frequency – energy and spatial characteristics of the coaxial – slot array. *International conference on antenna theory and techniques, 2013, Odessa, Ukraine*. 2013. P. 157-159.
11. Radiating Cables. URL: <http://www.eupen.com>.
12. Компания Times Microwave Systems. URL: <http://www.timesmicrowave.com>.
13. Єлизаренко А. О. Дослідження статистичних характеристик каналу з випромінюючим кабелем в тунелі метрополітену. Збірник наукових праць. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 78. С. 157-165.
6. Panchenko, S. V., Prykhodko, S. I., Yelizarenko, A. O., & Korolova, N. A. (2024). *Radiotekhnichni systemy zaliznychnoho transportu* [Radio engineering systems of railway transport]. UkrDUZT [in Ukrainian].
7. **Ministerstvo rehionalnoho rozvytku Ukrainy. (2018).** *DBN V.2.3-19:2018. Sporudy transportu. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia* [SBN V.2.3-19:2018. Transport structures. Railways of 1520 mm gauge. Design standards] (Nakaz No. 261). [in Ukrainian].
8. Yelizarenko, A. O. (2014). Vprovadzhennia dvodiapazonnykh merezh tekhnolohichnoho radiozviazku v tuneliakh zaliznyts [Implementation of dual-band networks of technological radio communication in railway tunnels]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 42-47 [in Ukrainian].
9. Gorobets, N. N., Lebedev, A. S., & Yelizarenko, A. A. (2017). [Paper presentation]. *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, Ukraine. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7972615/>
10. Katrich, V. A., Lyashchenko, V. A., & Medvedev, N. V. (2013). The frequency-energy and spatial characteristics of the coaxial-slot array. In *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques* (pp. 157-159). Odessa, Ukraine.
11. **Radiating cables. (n.d.).** <http://www.eupen.com>
12. **Times Microwave Systems. (n.d.).** <http://www.timesmicrowave.com>
13. Yelizarenko, A. O. (2006). Doslidzhennia statystychnykh kharakterystyk kanalu z vyprominiuiuchym kabelem v tuneli metropolitenu [Investigation of the statistical characteristics of a channel with a radiating cable in a subway tunnel]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, (78), 157-165 [in Ukrainian].
- Yelizarenko Andrii. Organization of train radio communication networks in mountainous terrain and in railway tunnels.**
- Proposals have been developed for the organization and calculation of train radio communication networks in mountainous areas of varying complexity and in railway tunnels.
- In mountainous terrain, the conditions for the propagation of radio waves in the VHF bands are

References

1. **TsRB 0004. Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy [TsRB 0004. Rules for the technical operation of railways of Ukraine] (Ofits. vyd.). (2007).** Transport Ukrainy [in Ukrainian].
2. **Derzhavna administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy. (2007).** *Pravyla ekspluatatsii poiznoho radiozviazku* [Rules for the operation of train radio communication] (Nakaz No. 452-Ts). [in Ukrainian].
3. **International Telecommunication Union. (2020).** *Recommendation ITU-R P.1546-6: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*.
4. **International Telecommunication Union. (2015).** *Recommendation ITU-R P.1406-3: Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands*.
5. **Derzhavna administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy "Ukrzaliznytsia". (2009).** *Pravyla orhanizatsii ta rozrakhunku merezh poiznoho radiozviazku TsSh-0058* [Rules for the organization and calculation of train radio

significantly complicated, which leads to increased signal attenuation and an increase in the depth of fluctuations.

Channels in the VHF band in tunnels can be organized only using radiating cables. The organization of dual-band systems in the hectometer and meter bands using a single radiating network has been proposed.

In the hectometer range, when using guide lines in train radio communication, the terrain has little effect on the conditions for the transmission of electromagnetic energy in the circuits.

In the KH range, when organizing radio communication in railway tunnels, it is necessary to suspend a single-wire or two-wire waveguide wire, which provides less attenuation.

Radiating cables are the most effective means of organizing channels in the VHF band in railway tunnels. The radiating cable provides not only the transmission of electromagnetic energy but also its radiation in the passage zone.

It can be noted that the calculated values of the root mean square deviation of spatial fluctuations at frequencies of 160 MHz for the RMC 7/8'' cable from EUPEN are 6.2 dB. This indicates the similarity of the structure of the radiated fields in the cables in both cases. In triaxial cables, the attenuation is greater, the depth of fluctuations is greater and is 9.7.

At higher frequencies of 460 MHz, 900 MHz, the attenuation in the cable increases significantly, although the root mean square deviation of the fluctuations of the radiated fields is almost the same.

These data can be used to calculate channels in promising railway radio communication systems in

tunnels, as a guideline in the actual design of train radio communication networks.

Єлизаренко 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 Andrii, Associate Professor of «Transport connection» department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: elizarenko1@ukr.net.
<https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Стаття надійшла 25.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

КАРГІН А. О., д.т.н, професор

КУЗЬМЕНКО Р. С., PhD студент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Модель імовірно-нечіткого контролера зі змінною структурою в контурі нечіткого управління автономним роботом

Розповсюдження безпілотних систем у різних сферах, насамперед промисловості, транспортній і військовій галузі, передбачає найголовніше завдання підвищення їхньої автономності. Рівень автономності цих систем безпосередньо залежить від їхньої здатності ухвалювати рішення в умовах невизначеності. Класичні нечіткі логічні системи (Fuzzy Logic System, FLS) дають змогу формалізувати ухвалення рішень в умовах неповного знань чи неточних даних, але мають певні обмеження. По-перше, налаштування нечіткої системи можливо тільки для нескладних завдань. По-друге, FLS не мають властивості масштабованості. По-третє, існують обмеження щодо реалізації нечітких рішень, отриманих FLS: відсутність апаратно реалізованих нечітких актуаторів потребує дефазифікації нечітких рішень, коли всі можливі варіанти рішення узагальнюють і зводять до одного числа, як наслідок, це унеможливає використання альтернативних або «слабких» рішень, що теж призводить до ситуації, які порушують автономність. У статті розглянуто шляхи подолання останнього обмеження на базі нової моделі штучного інтелекту, що відчуває (Feeling Artificial Intelligence, FAI). Запропоновано модифіковану версію FLS із моделлю ймовірно-нечіткого контролера зі змінною структурою (Probabilistic-Fuzzy Controller, PFC). FLS із моделлю PFC забезпечує вибір альтернативних керуючих дій у невизначених умовах, реалізуючи управління як випадкову величину з розподілом ймовірностей, що отримано на основі значень упевненості, що були розраховані FLS на етапі акумуляції нечітких правил. Це дає змогу реалізувати рішення, що не домінують у традиційній FLS. Показано переваги застосування модифікованої FLS із PFC моделлю для управління автономним роботом і наведено порівняння її рішень із тими, що отримані за допомогою класичної FLS. Визначення потрібної структури закону управління для вибраного значення керуючого рішення, що додатково робить PFC, додає адаптивності ймовірно-нечіткому контролеру зі змінною структурою в контурі нечіткого управління автономними системами і є ще однією його перевагою. У статті наведено результати розрахунків, моделювання та експериментів, що підтвердили практичну перевагу моделі. Новий підхід підвищує автономність безлюдних систем і адаптивність ухвалення керуючих рішень.

Ключові слова: автономна безпілотна система, робот, нечітка логічна система, імовірно-нечіткий контролер, контролер зі змінною структурою, штучний інтелект, що відчуває.

Вступ.

У своєму розвитку автономні роботизовані системи (Autonomous Robotic System, ARS) пройшли три етапи [1-3]. На першому етапі програмовані автоматичні ARS потребували повністю впорядкованого середовища, точного дотримання часових інтервалів і послідовності операцій. На другому етапі вимоги впорядкування середовища були частково зняті, ARS могли виконувати деякі функції в умовах перешкод і часткової невизначеності. Прикладами цього є роботи, що надають різні види послуг [4]. Сьогодні актуальними є інтелектуальні ARS (Intelligent ARS, IARS), які, як сподіваються, замінять людину в різних сферах її діяльності [5-10]. Широке розгортання IARS для вирішення завдань воєнного часу актуалізувало дослідження проблеми підвищення їхньої автономності: здатність IARS виконувати місію без втручання людини.

Автономність підтримують багато компонентів IARS. Ця стаття зосереджена на функції ухвалення рішень. Розглянемо основні особливості цього завдання IARS:

1) IARS належить до класу вбудованих систем, що працюють у реальному часі та безпосередньо взаємодіють із датчиками та виконавчими механізмами. Тому модель AI має бути компактною та ефективною [2, 3];

2) IARS використовує дані з великої кількості гетерогенних датчиків, що характеризує систему як мультимодальну та гетерогенну [11]. Цю особливість враховують у багатьох підходах щодо первинної обробки даних [12-14]. Однак головну вимогу щодо системи сприйняття IARS - результати обробки гетерогенних даних мають бути поданими однаково - вони не задовольняють;

3) IARS працює в середовищі, для якого характерні невизначеність і мінливість, зашумлені дані, а рішення ухвалюють в умовах неповних знань.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Від подолання вказаних проблем залежить рівень автономності системи. У роботі [15] визначено основні причини, що порушують автономність ухвалення рішень IARS, і для кожної з них рекомендовано способи вирішення. Деякі з них наведено нижче:

1) усі компоненти IARS мають бути базовані на універсальній моделі сенсу даних, отриманих від датчиків. Модель сенсу повинна мати можливість подавати дані за допомогою понять різного рівня узагальнення та абстракції;

2) формальна основа сенсу має бути побудована на моделі нечітких множин;

3) зменшення розмірності простору ухвалення рішень у реальному часі має бути виконана за допомогою технології Computing With Word [16], яка теж базована на апараті нечітких множин.

Отже, формальний апарат має бути побудований на нечітких моделях. На жаль, на сьогодні відсутні IARS, у яких системи ухвалення рішень базовані на нечіткій логіці. Головними перешкодами на шляху використання FLS у IARS є такі. По-перше, серед фахівців із нечітких систем існує переконання, що налаштувати реально нечітку систему можна тільки для нескладних завдань із кількістю вхідних змінних, що не перевищує 5-7 [16-18]. Ця обставина обмежує використання FLS у її «чистому» вигляді для таких сфер, як сучасна робототехніка, відповідно до особливостей вказаних вище. По-друге, FLS не має властивості масштабованості [15, 18]: додавання нових вхідних числових змінних або зміна кількості чи сенсу термінів лінгвістичних змінних потребує зміни існуючої бази знань. По-третє, існують обмеження щодо реалізації нечітких рішень, отриманих FLS: відсутність апаратно реалізованих нечітких актуаторів (виконавчих механізмів системи управління) потребує дефазифікації нечітких рішень, що теж призводить до

ситуацій, які порушують автономність. Шляхи подолання перших двох обмежень запропоновані в моделі FAI [19-21]. Третє обмеження, що пов'язане з проблемою дефазифікації, розглянуто в роботі [22], де введено модель імовірно-нечіткого конвертора (Fuzziness-to-Random Converter, F2RC), яка відтворює особливості біологічних систем для імплементації нечіткої впевненості, поданої як рівень нервового сигналу, в імовірнісний розподіл молекул-лігандів, які активізують м'язові волокна.

Мета статті – дослідити можливості застосування моделі F2RC для імплементації ухвалених FAI нечітких рішень; запропонувати для використання в IARS модифіковану версію FLS із моделлю PFC на базі F2RC; показати переваги застосування модифікованої FLS моделі з PFC і порівняти її рішення з тими, що отримані за допомогою класичної FLS.

Обговорення проблеми

Проблему розглянемо на прикладі управління рухом колісного робота. Маршрут, яким рухається колісний робот, зображено на рис. 1. Рельєф включає три типи поверхні: рух прямою горизонтальною ділянкою (I), рух під нахилом менше 30 градусів (II), рух під великим нахилом із кутом більше 30 градусів (III). Сенс точок 1, 2, ..., 9 стане зрозумілим з аналізу рішень, отриманих під час моделювання. Розглядають колісний робот, оснащений двигунами постійного струму 12 В із редукторами (12 V 100RPM DC Gear Motor) із модулем Adafruit Motor Shield v2.0, що підтримує до чотирьох двигунів. Вони забезпечують необхідний обертальний момент для руху на пересіченій місцевості і дають змогу реалізувати управління роботом, а саме рух вперед/назад із певною швидкістю, прискорення/гальмування, поворот на заданий кут завдяки різній швидкості обертання коліс правої і лівої сторін.

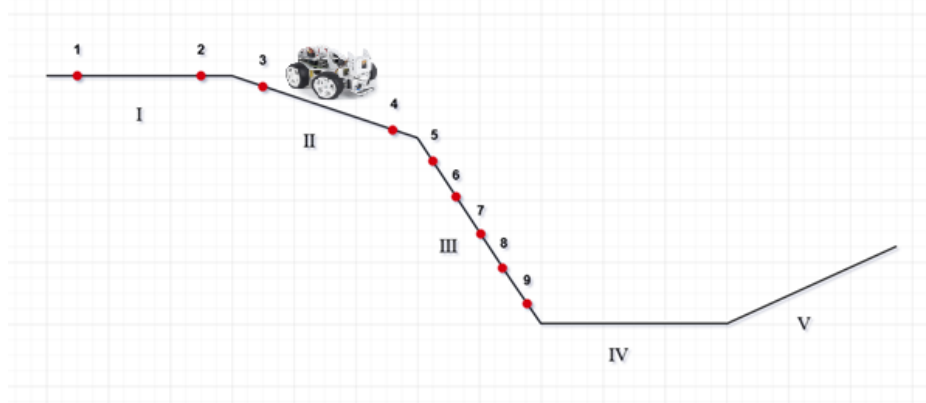


Рис. 1. Рельєф маршруту колісного робота

Сенсорна система робота включає одометр (оптичний енкодер KY-040 коліс), на базі якого драйвер виміряє кутову та лінійну швидкість і пройдено відстань; ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 на поворотній платформі; комбінований

модуль MPU-6050, що включає тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп; модуль TTP223В із датчиками зіткнень та інфрачервоні датчики відбиття для виявлення наближення до перешкод без дотику. У різних експериментах застосовано різний комплект сенсорів. Для перевірки моделі PFC було

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

застосовано комплект із двох датчиків: одометр і акселерометр із гіроскопом.

Склад системи управління рухом робота наведено на рис. 2. Це багаторівнева система з контролерів, що вирішують різні завдання. В експериментах, обговорюваних у цій статті, Line-following feedback controller і Feedforward controller of turn не були задіяні. Перевіряли рух робота на різних швидкостях по прямій лінії по рельєфу (рис. 1) з гори до низу.

Експерименти з дослідження руху робота по маршруту, зображеному на рис. 1, з управлінням традиційною FLS, що показана червоним блоком на рис. 2, проводили в такий спосіб. Спочатку в середовищі MATLAB Fuzzy Tools розраховували швидкість руху в різних точках маршруту, а потім цей режим руху перевіряли в штучному оточенні на прототипі вище згаданого робота.

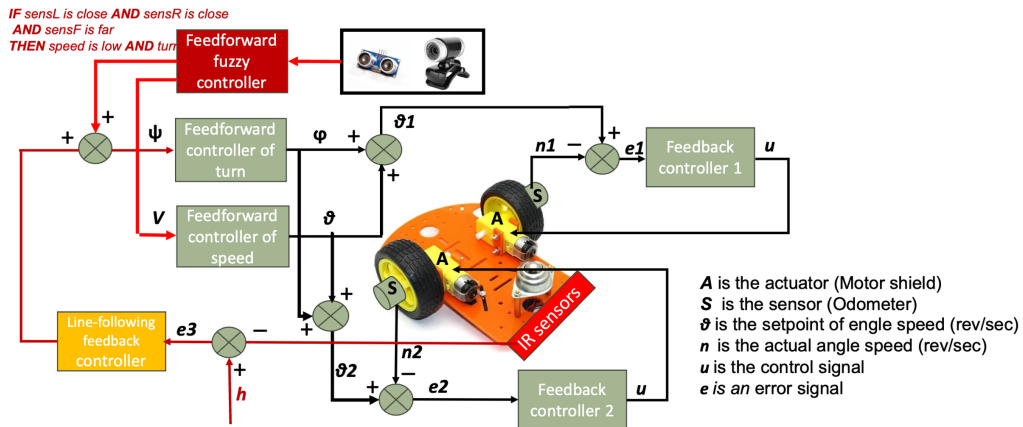


Рис. 2. Структура системи управління колісним роботом

У MATLAB Fuzzy Tools було створено нескладну нечітку систему із трьох вхідних чисельних змінних і однієї вихідної, що наведені в табл. 1. На цих універсумах були визначені три вхідні лінгвістичні змінні (Linguistic Variable, LV): Speed, Angle, Acceleration, а також вихідна LV Output_Speed. Змінна Speed описує лінійну швидкість руху колісного робота, змінна Angle відповідає за кут нахилу робота відносно горизонтальної поверхні, а

Acceleration характеризує його прискорення у просторі. Вихідна LV Output_Speed задає керуюче рішення про рекомендовану швидкість. Кожна LV подана як набір термів, наведених у табл. 1, де літери «n» і «p» означають відповідно, на якій півосі значень універсумів negative чи positive визначені терми.

Таблиця 1 Визначення LV

Лінгвістична змінна	Терм лінгвістичних змінних						
	nHigh	nMedium	nLow	None	pLow	pMedium	pHigh
Speed	trapmf [-85,-85, 50,-39]	trapmf [-50,-43,-23,-11]	trapmf [-20,-13,-5,0]	trimf [-6,0,+6]	trapmf [0,+5,+13,+20]	trapmf [+11,+23,+43,+50]	trapmf [+39,+50,+85,+85]
Angle	trapmf [-45,-45,-25,-17]	trapmf [-21,-18,-12,-8]	trapmf [-12,-8,-4,0]	trimf [-3.5,0,3.5]	trapmf [0,+4,+8,+12]	trapmf [+8,+12,+18,+21]	trapmf [+17,+25,+45,+45]
Acceleration	trapmf [-120,-120,-66,-44]	trapmf [-56,-48,-32,-20]	trapmf [-32,-20,-10,0]	trimf [-8,0,+8]	trapmf [0,+10,+20,+32]	trapmf [+20,+32,+48,+56]	trapmf [+44,+66,120,+20]
Output_Speed	trapmf [-85,-85, 50,-39]	trapmf [-50,-43,-23,-11]	trapmf [-20,-13,-5,0]	trimf [-6,0,+6]	trapmf [0,+5,+13,+20]	trapmf [+11,+23,+43,+50]	trapmf [+39,+50,+85,+85]

Використовуючи ці лінгвістичні змінні та знання експертів, було створено базу знань, фрагмент

якої, необхідний для пояснень результатів моделювання, наведено на рис. 3.

1. IF (Angle is None) and (Acceleration is None) then (Output_Speed is pHigh)

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2. IF (Speed is High) and (Angle is nLow) and (Acceleration is pLow) then (Output_Speed is pMedium)
3. IF (Angle is nLow) and (Acceleration is None) then (Output_Speed is pMedium)
4. IF (Speed is Medium) and (Angle is nMedium) and (Acceleration is pLow) then (Output_Speed is pLow)
5. IF (Angle is nHigh) and (Acceleration is pMedium) then (Output_Speed is None)
6. IF (Speed is None) and (Angle is nHigh) and (Acceleration is None) then (Output_Speed is nLow)
7. IF (Angle is nHigh) and (Acceleration is pLow) then (Output_Speed is pLow)
8. IF (Speed is Low) and (Angle is nHigh) and (Acceleration is pMedium) then (Output_Speed is pMedium)

Рис. 3. Фрагмент бази знань, що визначає рекомендовану швидкість руху

Результати моделювання переміщення робота по маршруту через задані точки наведені в табл. 2. Для нечіткого виведення було застосовано дві моделі: Мамдані і Цукamoto.

Результати симуляції в середовищі Matlab руху колісного робота

Номер точки маршруту	Speed, см/с	Angle, градус	Acceleration, см/с ²	Output_Speed, Модель Mamdani, см/с	Output_Speed, Модель Tsukamoto, см/с
1	10	0	2	64	47
2	64	0	3	64	45
3	64	-10	10	31	31
4	31	-15	14	9	9
5	9	-36	29	24	15
6	24	-36	29	24	15
7	24	-36	29	24	15
8	24	-36	29	24	15
9	24	-36	29	24	15

Колісний робот починає свій рух по горизонтальній поверхні (кут нахилу дорівнює нулю, а прискорення дорівнює 2 см/с²) і в точці 1 має швидкість 10 см/с (табл. 2). На основі бази знань (рис. 3) за допомогою нечіткого виведення по моделі Mamdani FLS рекомендує збільшити швидкість до 64 см/с. Із цією швидкістю робот рухається до точки 2 (рис. 1), у якій FLS рекомендує продовжити рух із цією швидкістю, тому що ця ділянка не має нахилу. Коли робот потрапляє на початок спуску в точку 3, значення негативного кута нахилу починає поступово збільшуватися. Такий кут нахилу призводить до того, що рекомендовано зниження швидкості (значення вихідної чисельної змінної дорівнює 31 см/с), оскільки актуалізовано правило 3 на рис. 3. Від точки 3 до точки 4 робот рухається в такому самому режимі, а з цього місця він заїжджає на ділянку (точки 5-9) із

великим кутом нахилу, що досягає значень до -36 град (рис. 4). Намагання контролера нижнього рівня підтримувати рух на цій ділянці з постійною рекомендованою швидкістю призводить до короткострокових різких гальмувань, і такий рух із дрібними коливаннями швидкості реєструє сенсор як прискорення, що має значення 29 см/с². Як видно з табл. 2, на всій ділянці від 5 до 9 точки значення вихідної бінної Output_Speed дорівнює 24 см/с. Це базовано на допущенні, що контролери обертів коліс зі зворотними зв'язками (Feedback controller 1 і Feedback controller 2 на рис. 2) під час спуску здатні підтримувати постійно рекомендовану швидкість. Із цим припущенням пов'язано дві проблеми, що обмежують застосування FLS в IARS.

Перша з них полягає в тому, що контролери нижнього рівня не на всьому діапазоні задаючих (цільових) значень однаково виконують завдання управління, особливо для широких діапазонів, як це має місце для розгляданого прикладу. Як показали експерименти з роботом прототипом, залежно від навантаження робота і цільового значення швидкості контролери нижнього рівня втрачали контроль над швидкістю обертання коліс: значення не поверталось до заданого, і робот різко і безповоротно набрав швидкість. Це може призвести до аварії, із якої IARS самостійно не спроможний вийти, тобто втратити автономність. У теорії управління цю проблему долають завдяки застосуванню інтелектуальних регуляторів зі змінною структурою [23]. У нашому випадку для різних ділянок цільового значення швидкості налаштовано окремі закони управління, чи то PID регулятор, чи то класичний нечіткий регулятор. Якщо повернутися до рис. 2, то замість одного Feedback controller 1 мають бути, наприклад, три: один для регулювання швидкості в діапазоні малих значень (Low), другий для діапазону середніх значень (Medium), третій для високих значень швидкості (High), які вказані в табл. 1.

Друга проблема пов'язана з тим, що для випадків, коли вхідна ситуація (значення вхідних змінних) не дуже змінюється, FLS видає одні і те самі значення на вихідних змінних. Так, для нашого прикладу, коли характеристики руху (швидкість і прискорення) і навколишня ситуація (кут нахилу) залишаються відносно незмінними, це призводить до того, що FLS знову і знову, коли перераховує вихідну змінну від точки 5 до точки 9, видає (рекомендує) одне і те саме значення швидкості (табл. 2), що, з одного боку, непогано, але саме це є другим обмеженням застосування в «чистому» вигляді FLS

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

для управління автономними системами. І це теж накладає обмеження на рівень автономності. Пояснимо таку ситуацію на даних, наведених на рис. 4. Із рисунка видно, що ситуація має невизначеність, і тому три різних правила (5, 7 і 8) із різною впевненістю рекомендують різні значення швидкості для такої ситуації. П'яте правило рекомендує зупинитися, сьоме правило рекомендує рухатися з низькою швидкістю, а восьме взагалі рекомендує середню швидкість. Тим не менш, FLS на етапах акумулювання та дефазифікації узагальнює ці рішення і обчислює кожен раз одне і те значення, яке не є прийнятним для наведеної на рис. 2 ситуації. Як уже було сказано, контролери нижнього рівня в цій

ситуації не завжди справлялися зі своїм завданням, і робот втрачав контроль над швидкістю: різко і безповоротно набирив швидкість. Це є аварією, із якої IARS самостійно не може вийти, тобто втрата автономності. У таких неповністю визначених ситуаціях краще було б, якби рішення, рекомендовані різними правилами, не узагальнювали, а на різних тактах нечіткого виведення надавали можливість спробувати рішення іншого правила: випадково реалізувати рішення різних правил з імовірністю, пропорційною значенню впевненості, отриманої з нечітким виведенням.

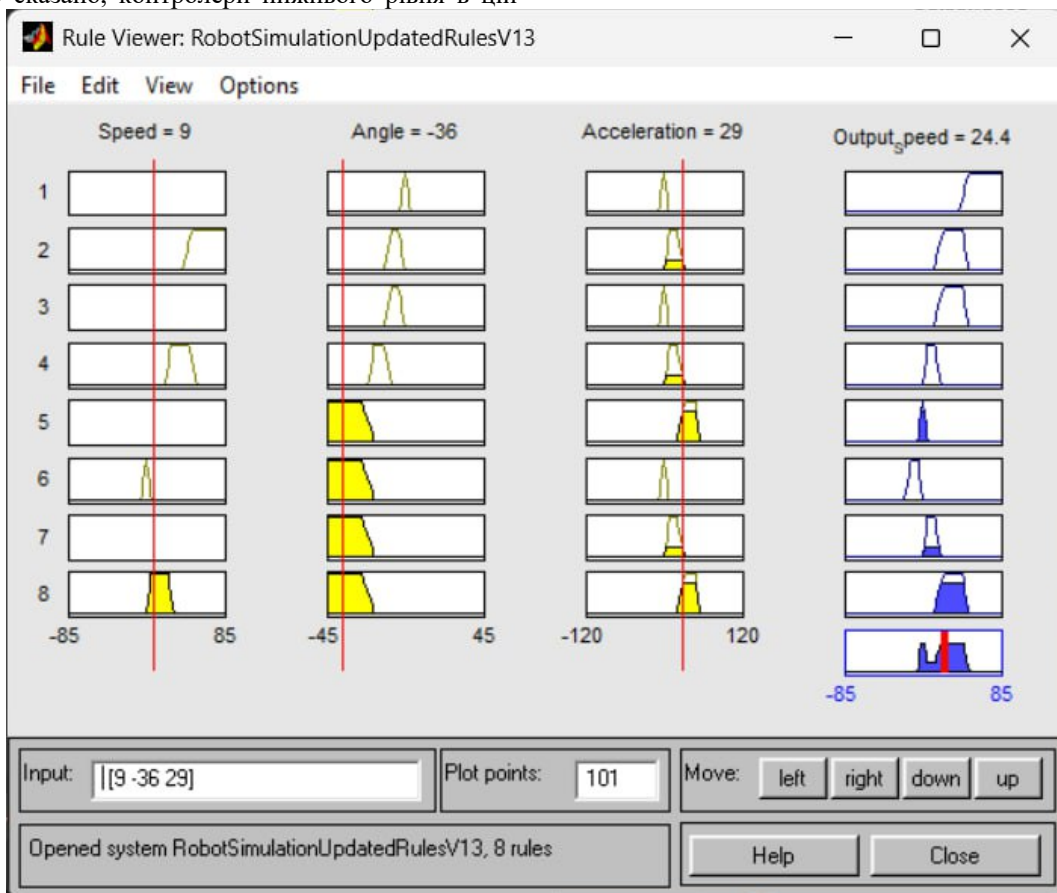


Рис. 4. Результати моделювання для точок 5-9 маршруту

П'яте і восьме правила з однаковою впевненістю 0.71 рекомендують конфліктні керуючі рішення. І якби в будь-якій точці третьої ділянки маршруту, наприклад, точці 7, випало б рішення зупинитися, то починаючи з цієї ситуації вже були б задіяні зовсім інші правила бази знань, і вони б рекомендували зовсім іншу поведінку робота, наприклад відповідно до шостого правила повільний рух назад у гору. Може не зовсім ефективно рішення, однак це рішення не призвело б до втрати автономності робота.

Дослідження моделі ймовірно-нечіткого контролера

Обидві проблеми, що були обговорені, обмежують застосування FLS в управлінні IARS. Однак ці проблеми можна подолати завдяки використанню ймовірно-нечіткого контролера в модифікованій моделі нечіткого виведення. Модифікація моделі нечіткого виведення полягає в тому, що перші три етапи класичної моделі, відомі як фазифікація, агрегація і актуалізація, залишаються незмінними, а четвертий і п'ятий етапи моделі - акумулювання і дефазифікація - замінювані на процедуру, виконувану за моделлю конвертора F2RC. Зберігання тотожними перші три етапи для обох моделей нечіткого виведення дає змогу порівнювати результати управління роботом, отримані з

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

використанням F2RC, із тими, що були проаналізовані раніше. Тому в подальших викладах у статті використано одну і ту саму нечітку систему з

тими самими входними і вихідними змінними, значеннями LV і базою правил, що розглянуто вище.

На рис. 5 зображена структура модифікованої нечіткої системи.

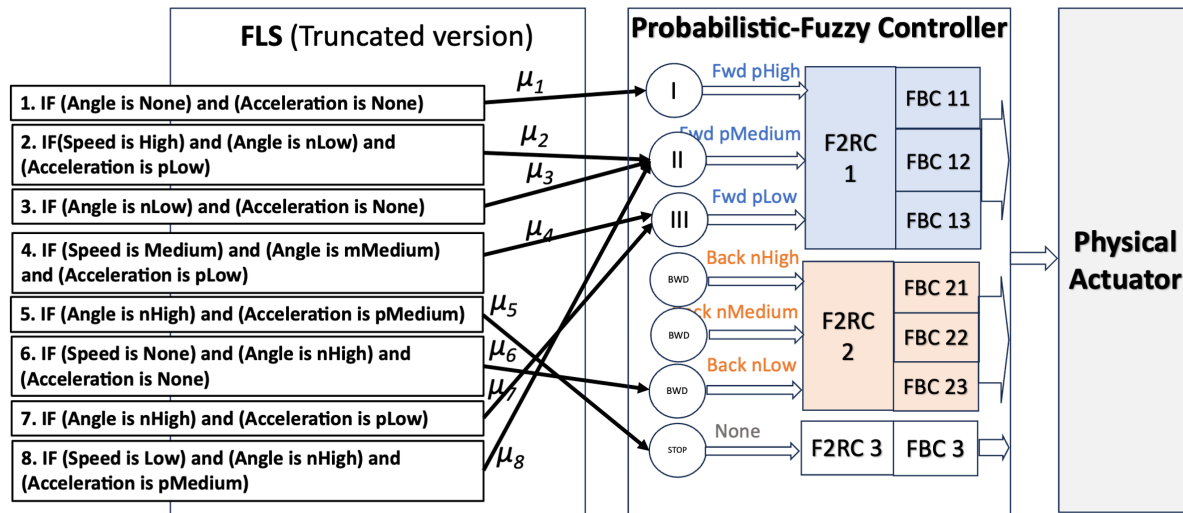


Рис. 5. Структура нечіткої системи з імовірісно-нечітким контролером

Результати обробки після етапу актуалізації кожного i -го правила подані як значення впевненості μ_i . Ці значення подано на j -й вхід імовірісно-нечіткого контролера. Структура входів PFC відповідає структурі вихідної LV традиційної нечіткої системи, а саме кожному терму LV поставлено відповідний вхід PFC. Більш того, множину входів PFC поділено між трьома конверторами F2RC 1, F2RC 2 і F2RC 3. Конвертор F2RC 1 об'єднує такі терми вихідної лінгвістичної змінної Output_Speed (табл. 1), як pHigh, pMedium, pLow. Входи F2RC 2 відповідають термам nHigh, nMedium, nLow цієї ж LV Output_Speed. Вхід F2RC 3 відповідає одному терму None, що моделює зупинення руху або миттєве гальмування. Із кожним конвертором пов'язано декілька контролерів FBC, налаштованих на управління в тих діапазонах задаючих значень (універсуму), які вказані у визначенні відповідних термів вихідної LV. Так, на рис. 5 конвертор F2RC 1 має три входи для трьох термів pHigh, pMedium, pLow. Контролер FBC 11 (один із трьох контролерів «Feedback controller 1» на рис. 2) налаштований на управління швидкістю в діапазоні цільових значень [+39, +85], який вказано в табл. 1 для визначення терму pHigh. Контролери FBC 12 і FBC 13 налаштовані на діапазони, що задані для визначення термів pMedium і pLow відповідно. Вихід PFC пов'язаний із входом фізичного актуатора (Physical Actuator на рис. 5).

Як видно з рис. 5, значення впевненості μ_i , отримані після обробки на етапі активізації i -го

правила, подають на той вхід PFC, який відповідає терму в полі ТОДІ цього правила. Якщо декілька правил мають у полі ТОДІ один і той самий терм, то значення впевненості цих правил акумулюють.

Отже, технологія обробки входних даних PFC така.

На першому кроці для кожного входу виконується акумуляція значень належності μ_i , отриманих після обробки на етапі активізації всіх правил, які пов'язані з цим входом PFC, аналогічно тому, як це зроблено в моделі Мамдані:

$$\mu^* = \text{MAX}(v_1 \cdot \mu_1, v_2 \cdot \mu_2, \dots, v_k \cdot \mu_k), \quad (1)$$

κ - кількість правил які посилають на терм, що подано як вхід PFC.

Отримані значення впевненості μ^* перетворюються в нечіткий фактор впевненості - $1 < \alpha < +1$ [23] за формулою

$$\alpha^* = 2 \cdot \mu^* \begin{cases} 1 \\ \end{cases} \quad (2)$$

На другому кроці розраховують виходи конверторів. Розглянемо це на прикладі F2RC 1, який має три входи (рис. 5). Конвертор перетворює значення фактора впевненості α^* на вході в реалізацію випадкового числа. Сенс цього числа - це кількість елементарних актуаторів, що активують відповідну дію (управління). Модель цього етапу наведено в роботі [22]. На рис. 6 показана структура конвертора на прикладі F2RC 1. Конвертор імітує

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

процес активізації м'язів живих істот, де значення впевненості, подане як рівень потенціалу нейрона, перетворюється в кількість лігандів-іонів, що випромінюються і розповсюджуються в просторі серед елементарних актуаторів, якими є волокна м'язів (фізичний актуатор). Кількість лігандів пропорційна потенціалу нейрона. Ліганди випадково зустрічаються з елементарними актуаторами з імовірністю, пропорційній їхній кількості. На рис. 6 набір глобул моделює пучки м'язових волокон (клітин), що складають окремих м'яз (фізичний актуатор). Кожна глобула - це пучок, що складається з набору м'язових волокон. На рисунку м'язові волокна зображені трикутниками чорного та червоного кольорів і названі елементарними актуаторами. Є три типи глобул, показані різними кольорами:

помаранчевим, зеленим і синім, для зображення різних способів реалізації дії. Глобули торкаються кіл такого самого кольору, які моделюють взаємодію пучків із руховими нейронами соматичної нервової системи. Модель м'язових пучків може реалізувати дію трьома способами, залежно від того, який вхідний сигнал отримує активацію у вигляді значення факторів впевненості. Отже, модель F2RC, що графічно подана на рис. 6, формально задана набором параметрів $l, q_j, j = 1, \dots, l, r$, де l - кількість входів конвертора, q_j - кількість глобул, пов'язаних із j -м входом, r - кількість елементарних актуаторів однієї глоби. Загальна кількість елементарних актуаторів, пов'язаних із j -м входом, $N_j = q_j \cdot r$, загальна кількість елементарних актуаторів, пов'язаних у цілому з конвертором, $N = N_1 + N_2 + \dots + N_l$.

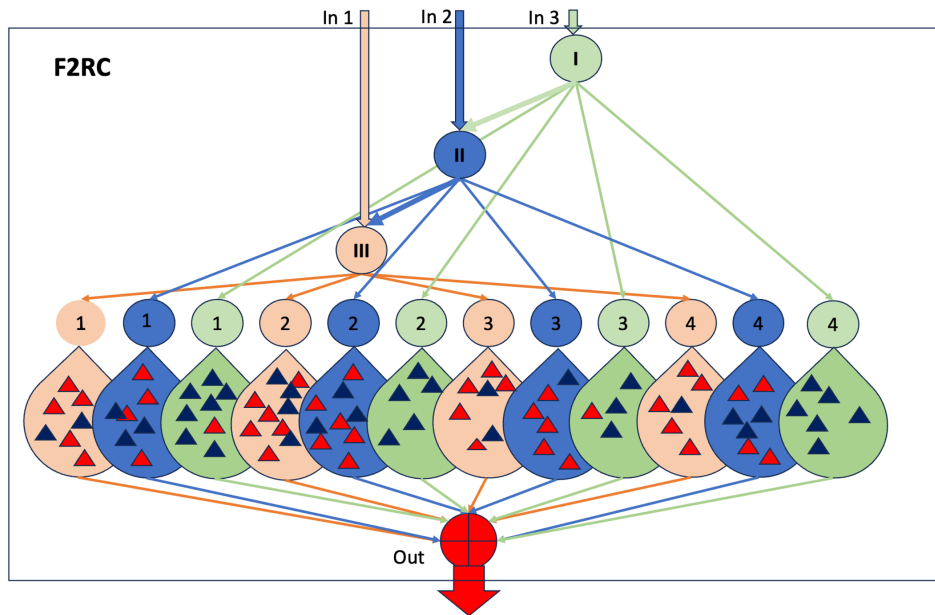


Рис. 6. Структура конвертора F2RC

Конвертор реалізує такий алгоритм обчислень. Спочатку на вхід III конвертора подана послідовність $(a_{III}^*, a_{III}^*, \dots, a_{III}^*)$ довжиною t , що складена з однієї і тієї самої кількості a_{III}^* (фактор впевненості знайдений на першому кроці для III входу). Для цієї послідовності F2RC моделює ймовірнісний процес активізації елементарних актуаторів i , як наслідок, видає число цілого типу $0 < n_j < N_j$, де n_j є кількість елементарних актуаторів, які знаходяться в активному стані і належать всім q_{III} глобулам. Потім процедура виконується для входу II, вхідні значення a_{II}^* якого розповсюджені і на вхід III (рис. 6), тільки в моделюванні задіяні не всі елементарні актуатори, що належать входу III, а ті, що не були в активному стані на кінець моделювання входу III. Отже, на вхід II подано пакет $(a_{II}^*, a_{II}^*, \dots, a_{II}^*)$ довжиною t факторів впевненості, і підраховують кількість елементарних актуаторів в активному стані: n_{12} і n_2 , де n_{12} - це кількість активних елементарних актуаторів, що належать глобулам входу III серед тих, що брали

участь у моделюванні входу II. Аналогічно моделюють вхід I: подано пакет $(a_I^*, a_I^*, \dots, a_I^*)$ на всі три входи, попередньо виключивши з моделювання елементарні актуатори в активному стані, що належать входу II і множині відібраних раніше входу III. Результат моделювання подано як набір чисел n_{123}, n_{23} і n_3 , де n_{123} - це кількість активних елементарних актуаторів входу III серед тих, що брали участь у моделюванні входу I. На основі цих даних спочатку розраховують переможця i^* серед всіх l входів F2RC:

$$h = n_i^*/N_i^* = \text{MAX}(n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_l/N_l), \quad (3)$$

а потім остаточне значення на виході конвертора як загальну кількість елементарних актуаторів в активному стані, що була активована входом-переможцем:

$$d = (n_i^* + n_{i^*-1} + \dots + n_{i^*-1} \cdot i^*-2 \dots 1). \quad (4)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, результати другого кроку обчислень подано як пару чисел (3) і (4) для всіх k конверторів контролера:

$$\{h_i, d_i\}_{i=1,k} \quad (5)$$

На третьому кроці визначають контролер FBC (рис. 5), який буде активований, і цільове значення керуючого сигналу для ситуації, у якій знаходиться робот. Для цього тепер знаходять переможця i^* серед конверторів (5), визначають, якому діапазону $\{U_1, U_2, \dots, U_g\}$ належить його вихідний сигнал d_{i^*} , і активують контролер FBC $_m$, який підтримує це цільове значення d_{i^*} .

$$h_{i^*} = \text{MAX}(h_1, h_2, \dots, h_k), \quad D = d_{i^*} \cdot \gamma \in U_m, \quad (6)$$

де γ - масштабний коефіцієнт перерахунку від універсуму, на якому визначені виходи F2RC, до універсуму, на якому визначають входи FBC.

Розглянемо застосування описаної вище модифікованої нечіткої системи для управління

роботом на прикладі, що був наведений для традиційної FLS: переміщення робота від точки 5 до точки 9 (рис. 1) за управління PFC.

Результати розрахунків першого кроку алгоритму наведені у другому стовпчику табл. 3. Розрахунки виконували для тих самих значень впевненості μ , які були отримані після етапу активізації правил і застосовані для традицій FLS, а саме $\mu_1 = 0.0, \mu_2 = 0.0, \mu_3 = 0.0, \mu_4 = 0.0, \mu_5 = 0.72, \mu_6 = 0.0, \mu_7 = 0.28, \mu_8 = 0.71$.

Розрахунки кількості активних елементарних актуаторів для точок № 5, 6, 7, 8, 9

Вхід F2RC	Фактор впевненості α^*	Параметр F2RC				Кількість активних елементарних актуаторів $n_1/n_{12}/n_{123}, n_2/n_{23}, n_3$				
		m	r	q	N	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9
l	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
pHigh	-1.0	45	9	11	99	0	0	0	0	0
pMed	0.42	45	9	11	99	40/0	33/0	31/0	39/0	28/0
pLow	-0.44	45	9	11	99	1/38/0	0/32/0	0/33/0	0/40/0	0/33/0
nHigh	-1.0	45	9	11	99	0	0	0	0	0
nMed	-1.0	45	9	11	99	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
nLow	-1.0	45	9	11	99	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
None	0.42	45	9	11	99	38	34	36	36	43

Із таблиці видно, що контролер складається з трьох конверторів, відповідно до рис. 5. Параметри конверторів, що графічно зображені на рис. 6, наведені у стовбцях 3-6 табл. 3. Результати обчислень на другому кроці алгоритму вказані в стовпцях 7-11 табл. 3. На основі цих даних обчислення за формулами (3) і (4) дають остаточні результати другого кроку обчислень у вигляді виразу (5) для точки 5.

$$h_1 = \text{MAX}(0/99, 40/99, \dots, 1/99) = 0.4; \quad d_1 = (40+39) = (79);$$

$$h_2 = \text{MAX}(0/99, 0/99, \dots, 0/99) = 0.0; \quad d_2 = 0.0;$$

$$h_3 = \text{MAX}(38/99) = 0.38; \quad d_3 = 0.0. \quad (7)$$

Після обчислень на третьому кроці на основі даних (7) визначають контролер FBC і цільове значення швидкості на його вході, яку він має забезпечувати.

$$h_1 = \text{MAX}(0.4, 0.0, 0.38) = 0.4, \quad \gamma = 85/297 = 0.29, \quad D_1 = 79 \cdot 0.29 = 22.9,$$

$$D_1 \subset [11, 50], \text{ FBC } 12.$$

Результати розрахунків для інших точок маршруту наведені в табл. 4.

Таблиця 4
Розрахунки рекомендованої швидкості і визначення структури контролера FBC для точок 5, 6, 7, 8, 9. Модифікована FLS модель

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Терм	FBC	Діапазон	Номер точок маршруту				
			5	6	7	8	9
nHigh	FB C 21	[-85, -39]					
nMed	FB C 22	[-50, -11]					
nLow	FB C 23	[-20, 0]					
None	FB C 3	[-6, +6]		2.06/3	2.18/3		2.6/3
pLow	FB C 13	[0, +20]					
pMed	FB C 12	[+11, +50]	22.9/12			22.9/12	
pHigh	FB C 11	[+39, +85]					

Розрахунки для точок 5-9 проводили для значень фактора впевненості α^* відповідно до табл. 3. Нагадаємо, що ці значення відповідають параметрам руху, які застосовували для моделювання управління класичної FLS, що вказані в табл. 2 у стовбцях Speed, Angle і Acceleration. Так, у п'ятій точці маршруту PFC рекомендує швидкість 22.9 см/с і вибирає структуру контролера FBC 12, що майже співпадає з тим, що рекомендував класичний FLS контролер 24 см/с (табл. 2). Але моделювання продовжували для точки 6 зі значенням вхідної швидкості 24 см/с, що вказане в табл. 2. Для цієї ситуації PFC вибрав значення швидкості 2.06 см/с і структуру контролера FBC 3 (табл. 4). Це управління вже кардинально відрізняється від того, що було реалізовано класичним FLS контролером 24 см/с (табл. 2). Як було зазначено раніше, зупинка чи рух робота з малою швидкістю 2.06 см/с (рекомендація PFC) повністю відповідають ситуації безаварійного завершення руху, ніж продовження руху зі швидкістю 24 см/с (рекомендація класичного FLS контролера). В експерименті моделювання проводили з припущенням, що рух у точках 7-9 відбувався не з рекомендованою PFC швидкістю, а з тією, що була в експериментах із класичним FLS контролером, тобто 24 см/с, із метою дослідити, якою мірою PFC здатний запобігти аварійній ситуації. Із табл. 4 видно, що в точках 7 і 9 контролер рекомендує майже зупинитися. Тобто на практиці, дійсно, із великою ймовірністю робот на ділянці від 5 до 9 точки змінив би режим руху, чого не здатна рекомендувати FLS із класичним дефазифікатором.

Висновки

PFC, на відміну від існуючих нечітких контролерів, на етапі дефазифікації нечітких рішень знаходить чисельне значення управління як

реалізацію випадкового числа, імовірнісний розподіл якого відповідає нечіткій впевненості, отриманій на етапі активізації правил. Це відкриває можливість реалізації команди, яка не була першою у списку пріоритетів, і в традиційній FLS не отримала би переваги серед усіх потенційно можливих команд. Ця особливість є важливою для виконавчих механізмів, що використовують в автономних системах. В умовах невизначеності, коли автономна система опиняється в незнайомій ситуації, усі існуючі прототиби реакцій мають малу впевненість. У таких випадках важливо спробувати різні варіанти управління, а не лише той, що є усередненим серед усіх, як це має місце за традиційної дефазифікації у FLS. Визначення потрібної структури закону управління для вибраного значення управління, що додатково робить PFC, це є ще однією його перевагою. Експерименти, наведені в роботі, підтвердили можливість реалізації запропонованої моделі.

У майбутньому заплановано дослідити універсальну модель PFC і розробити рекомендації з її використання в різних додатках м'якого управління в автономних системах.

Список використаних джерел

- Zhang T. et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems, *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.* 2017. Vol. 18. P. 68–85, DOI: 10.1631/FITEE.1601650.
- Chen J., Sun J., Wang G. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems. *Engineering.* 2022. Vol. 12. P. 16–19, DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.007.
- Reis J., Cohen Y., Melao N., Costa J., Jorge D., High-Tech Defense Industries: Developing Autonomous Intelligent Systems, *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, No. 11. DOI: 10.3390/app11114920.
- Guizzo E. Types of Robots. 2018. URL: <https://robotsguide.com/learn/types-of-robots> (last accessed: 22.01.2026)
- Shakhatreh H. et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *J. IEEE Accessl.* 2019. Vol. 7. P. 48572–48634, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909530
- NovAtel, Unmanned Systems. 2022. URL: <https://novatel.com/industries/unmanned-systems> (last accessed: 20.09.2022).
- Lockheed M. The Future of Autonomy. Isn't Human-Less. It's Human More. 2022. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html> (last accessed: 25.09.2022).
- Rasmussen S., Kingston D., Humphrey L. Brief Introduction to Unmanned Systems Autonomy Services (UxAS). *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Sys. (ICUAS).* 2018. DOI: 10.1109/ICUAS.2018.8453287.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

9. Litman T. A. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. 2022. URL: <https://www.vtpi.org/avip.pdf> (last accessed: 25.09.2022).
10. Joseph L., Mondal A. K. (eds) Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS). Applications, Development, Legal Issues, and Testing, 1st ed., CRC Press, Boca Raton. 2021. DOI: 10.1201/9781003048381.
11. Yasumoto K., Yamaguchi H., Shigeno H. Survey of Real-time Processing Technologies of IoT Data Streams. *Journal of Information Processing*. 2016. Vol. 24, No. 2. P. 195–202, DOI: 10.2197/ipsjip.24.195.
12. Klein L. A. Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making. 2nd ed. SPIE Press, Bellingham. 2012. DOI: 10.1117/3.928035.
13. Gou J., Yu B., Maybank S. J., Tao D. Knowledge Distillation: A Survey. *International J. of Computer Vision*. 2021. Vol. 129. P. 1789–1819. DOI: 10.1007/s11263-021-01453-z.
14. Hu X., Shen Y., Pedrycz W., Li Y., Wu G. Granular Fuzzy Rule-Based Modeling With Incomplete Data Representation. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022. Vol. 52, No. 7. P. 6420–6433. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3071145.
15. Kargin A., Petrenko T. Knowledge Distillation for Autonomous Intelligent Unmanned Systems / In: Pedrycz, W., Chen, S.-M. (eds.). *Advancements in Knowledge Distillation: Towards New Horizons of Intelligent Systems*, Studies in Computational Intelligence. 2023. Vol. 1100, Springer. P. 193–230. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8_7.
16. Kargin A., Petrenko T. Multi-level Computing With Words Model to Autonomous Systems Control. In: Pakstas A., Hovorushchenko T. (eds.). *Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2711, CEUR. P. 16–30. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>.
17. Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnberger A. Fundamentals of Control Theory. *Fuzzy Control, Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2006. Vol. 200, Springer, Heidelberg. P. 57–234. DOI: 10.1007/3-540-31766-x_2.
18. Piegat A. Fuzzy modelling and control. *Studies in Fuzziness and Soft Computing. Physica*. 2001. Heidelberg; New York. DOI: 10.1007/978-3-7908-1824-6.
19. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems. Proc. Global Conf. on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT), Alamein New City, Egypt: IEEE, 2022. P. 88–93. DOI: 10.1109/GCAIoT57150.2022.10019235.
20. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence. Cognitive Decision-making Model Borrowed from Living Beings. International Symposium on Networks, Computers and Communications, Washington, DC, USA: IEEE, 2024. P. 1–6.
21. Kargin A., Petrenko T. Event-Driven Architecture of Feeling Artificial Intelligence Supported by Data Aging Model. In: Mejdoub Y., Elamri A., Kardouchi M. (eds.) *Connected Objects, Artificial Intelligence, Telecommunications and Electronics Engineering (COCIA 2025)*. Lecture Notes in Networks and Systems. 2025. Vol. 1584. Cham: Springer. P. 178–183. DOI: 10.1007/978-3-032-01536-5_27.
22. Каргін А. О., Кузьменко Р. С. Модель ймовірно-нечіткого актуатора в контурі м'якого управління автономною безлюдною системою. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 61–72. DOI: 10.30837/2522-9818.2025.1.061.
23. Каргін А. О. Вступ до інтелектуальних машин. Кн. 1. Інтелектуальні регулятори. Донецьк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. 526 с.

References

- Zhang, T., et al. (2017)**. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18, 68–85. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601650>
- Chen, J., Sun, J., & Wang, G. (2022)**. From unmanned systems to autonomous intelligent systems. *Engineering*, 12, 16–19. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.10.007>
- Reis, J., Cohen, Y., Melao, N., Costa, J., & Jorge, D. (2021)**. High-tech defense industries: Developing autonomous intelligent systems. *Applied Sciences*, 11(11), Article 4920. <https://doi.org/10.3390/app11114920>
- Guizzo, E. (2018)**. *Types of robots*. <https://robotsguide.com/learn/types-of-robots>
- Shakhtrah, H., et al. (2019)**. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- NovAtel. (2022)**. *Unmanned systems*. <https://novatel.com/industries/unmanned-systems>
- Lockheed Martin. (2022)**. *The future of autonomy isn't human-less. It's human more*. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>
- Rasmussen, S., Kingston, D., & Humphrey, L. (2018)**. Brief introduction to unmanned systems autonomy services (UxAS). In *Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.

- IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453287>
9. **Litman, T. A. (2022).** *Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning*. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org/avip.pdf>
 10. **Joseph, L., & Mondal, A. K. (Eds.). (2021).** *Autonomous driving and advanced driver-assistance systems (ADAS): Applications, development, legal issues, and testing* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003048381>
 11. **Yasumoto, K., Yamaguchi, H., & Shigeno, H. (2016).** Survey of real-time processing technologies of IoT data streams. *Journal of Information Processing*, 24(2), 195-202. <https://doi.org/10.2197/ipsjip.24.195>
 12. **Klein, L. A. (2012).** *Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making* (2nd ed.). SPIE Press. <https://doi.org/10.1117/3.928035>
 13. **Gou, J., Yu, B., Maybank, S. J., & Tao, D. (2021).** Knowledge distillation: A survey. *International Journal of Computer Vision*, 129, 1789-1819. <https://doi.org/10.1007/s11263-021-01453-z>
 14. **Hu, X., Shen, Y., Pedrycz, W., Li, Y., & Wu, G. (2022).** Granular fuzzy rule-based modeling with incomplete data representation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(7), 6420-6433. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3071145>
 15. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2023).** Knowledge distillation for autonomous intelligent unmanned systems. In W. Pedrycz & S.-M. Chen (Eds.), *Advancements in knowledge distillation: Towards new horizons of intelligent systems* (Vol. 1100, pp. 193-230). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8_7
 16. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2020).** Multi-level computing with words model to autonomous systems control. In A. Pakstas & T. Hovorushchenko (Eds.), *CEUR Workshop Proceedings: Vol. 2711* (pp. 16-30). CEUR-WS. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>
 17. **Michels, K., Klawonn, F., Kruse, R., & Nürnberger, A. (2006).** Fundamentals of control theory. In *Fuzzy control* (Vol. 200, pp. 57-234). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-31766-x_2
 18. **Piegat, A. (2001).** *Fuzzy modelling and control*. Physica. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>
 19. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2022).** Feeling artificial intelligence for AI-enabled autonomous systems. In *Proceedings of the Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT)* (pp. 88-93). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GCAIoT.2022.10019235>
 20. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2024).** Feeling artificial intelligence: Cognitive decision-making model borrowed from living beings. In *Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications* (pp. 1-6). IEEE.
 21. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2025).** Event-driven architecture of feeling artificial intelligence supported by data aging model. In Y. Mejdoub, A. Elamri, & M. Kardouchi (Eds.), *Connected objects, artificial intelligence, telecommunications and electronics engineering (COCIA 2025)* (Vol. 1584, pp. 178-183). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-01536-5_27
 22. **Kargin, A. O., & Kuzmenko, R. S. (2025).** Model imovirmisno-nechitkoho aktuatora v konturi miakoho upravlinnia avtonomnoiu bezliudnoiu systemoju [Model of a probabilistic-fuzzy actuator in the soft control loop of an autonomous unmanned system]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti*, (1(31)), 61-72. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.061> [in Ukrainian].
 23. **Kargin, A. O. (2010).** *Vstup do intelektualnykh mashyn. Kn. 1. Intelektualni rehuliatory* [Introduction to intelligent machines. Book 1. Intelligent regulators]. Nord-Press; DonNU [in Ukrainian].

Anatolii Kargin, Roman Kuzmenko. A model of a probabilistic-fuzzy controller with a variable structure in the fuzzy control loop of an autonomous robot

The widespread adoption of unmanned systems across various domains, primarily in industry, transportation, and the military sector, brings to the forefront the challenge of increasing their level of autonomy. The autonomy level of such systems directly depends on their ability to make decisions under conditions of uncertainty. Classical Fuzzy Logic Systems (FLS) enable the formalization of decision-making in situations involving incomplete knowledge or imprecise data; however, they have several limitations. First, the tuning of a fuzzy system is feasible only for relatively simple tasks. Second, FLS lacks scalability. Third, there are limitations in implementing fuzzy decisions produced by FLS: the absence of hardware-implemented fuzzy actuators necessitates defuzzification, which aggregates all possible decision alternatives into a single crisp value. As a consequence, the use of alternative or «weak» decisions becomes impossible, which in turn leads to situations that limit system autonomy. This paper explores approaches to overcoming the latter limitation using a new artificial intelligence model, referred to as Feeling Artificial

Intelligence (FAI). A modified version of the FLS is proposed, incorporating a Probabilistic-Fuzzy Controller (PFC) with a variable structure. PFC provides a choice of alternative control actions under uncertain conditions, implementing control as a random variable with a probability distribution, which is defined based on the value of fuzzy certainty of the rule computed by FLS at the accumulation stage of fuzzy inference. This enables the implementation of solutions that do not dominate in traditional FLS. The advantages of using a modified FLS with a PFC model for controlling an autonomous robot are demonstrated, and its solutions are compared with those obtained with a classical FLS. Determining the required structure of the control law for the selected control solution, which also implements PFC, adds adaptability to the probabilistic-fuzzy controller with a variable structure in the fuzzy control circuit of autonomous systems, and is another of its advantages. The article presents the results of computations, modeling, and experiments that confirmed the practical advantage of the model. The new approach increases the autonomy of unmanned systems and the adaptability of making control decisions.

Keywords: autonomous unmanned system, robot, fuzzy logic system, probabilistic-fuzzy controller, variable-structure controller, Feeling Artificial Intelligence.

Каргін Анатолій Олексійович, доктор технічних наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри інформаційних технологій, Харків, Україна. E-mail: kargin@kart.edu.ua. ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

Кузьменко Роман Сергійович, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kuzmenko88@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1675-8658>.

Kargin Anatolii, Doctor of Technical Science, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Information Technology, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kargin@kart.edu.ua. ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

Roman Kuzmenko, PhD Student at the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kuzmenko88@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1675-8658>.

Стаття надійшла 02.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 07.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

ШЕЛЕХАНЬ Г. І., канд. техн. наук, доцент,
ПОГОРСЛОВ В. В., магістр
(Український державний університет залізничного транспорту)

Підвищення ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та морського порту

Анотація. У статті проаналізовано сучасний стан і умови функціонування припортової вантажної станції з позиції ефективності її взаємодії з морським портом для обробки вагонопотоків з експортними вантажами. Виконано формалізацію процесу обробки експортних вагонопотоків на станції з урахуванням мінімуму часу простою вагонів в очікуванні технологічних операцій. Сформована математична модель дає змогу враховувати випадковість подавання місцевих вагонів з експортними вантажами у порт, оцінювати ефективність використання об'єктів станційної та портової інфраструктури, прогнозувати середній час простою місцевих вагонів.

Ключові слова: припортові станції, подавання вагонів, простій місцевих вагонів, експортні вагонопотоки.

Постановка проблеми.

У сучасному середовищі, для якого характерні економічна нестабільність та інтенсивна конкуренція у сфері транспортних послуг, особливої значущості набуває проблема підвищення рівня сервісу на залізничному транспорті. Реалізація концепції, орієнтованої на потреби споживача, охоплює весь комплекс операцій – від формування планів перевезень до практичного виконання транспортного процесу – і має забезпечувати раціональне використання наявних пропускних можливостей залізничної інфраструктури та виробничої потужності станцій. Такий підхід дає змогу ефективно задовольняти будь-які запити на вантажні перевезення із забезпеченням надійності, точності та зручності вантажовласників.

Проте на сьогодні є недостатньо узгодженою взаємодія між учасниками ринку вантажних перевезень: операторів рухомого складу, вантажовласників, перевізників, що призводить до порушення технології роботи вантажних станцій, особливо спеціалізованих з обслуговування місць незагального користування. На станціях накопичується значна кількість вагонів, які належать різним власникам, що ускладнює виконання місцевої роботи. При цьому знижується надійність вантажних станцій для виконання основних функцій: обслуговування клієнтів послуг залізничного транспорту з виконання операцій із приймання та відправлення поїздів, подавання та прибирання вагонів і завантаження-вивантаження вантажів відповідно до заявок клієнтів.

Обслуговування клієнтів залізничного транспорту здійснюється нерівномірно, а залізниці зазнають збитків через перевищення робочого парку вагонів і їхні непродуктивні простой на станціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В умовах зростання глобальних ланцюгів постачання територією України та нарощування обсягів вантажоперевезень припортові залізничні станції часто стають «вузькими місцями», а ефективність їхньої взаємодії з морським транспортом набуває критичного значення для національної та світової економіки. Сучасні наукові праці, присвячені цій проблематиці, досліджують головні аспекти підвищення ефективності функціонування залізничної інфраструктури, включаючи новітні технологічні рішення, оптимізацію технічних і технологічних процесів, підвищення переробної спроможності та зменшення простоїв рухомого складу [1-4]. Дослідження демонструють комплексний підхід щодо розв'язання проблеми дисбалансу потужностей і операційної ефективності [5-7]. Значна частина наукової новизни зосереджена у сфері інтегрованого планування та застосування передових математичних методів і програмних рішень [8-9].

Так, автори роботи [10] навели новітній метод оптимізації розкладу та розподілу ресурсів на припортових залізничних станціях. Головний результат роботи – розроблення інтегрованої оптимізаційної моделі на основі змішаного цілочисельного лінійного програмування, рішення якої мінімізує сукупний час простою поїздів і порожній пробіг маневрових локомотивів. Для досягнення цього автори використали суміщену

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

архітектуру глибокого навчання з підкріпленням. Це дає змогу досягти вищої якості рішень порівняно з традиційними евристичними підходами, підвищуючи загальну експлуатаційну ефективність станції та зменшуючи простої рухомого складу.

У сегменті контейнерних перевезень група авторів [11] запропонувала процесно-центрований метод оцінювання доцільності впровадження системи «порт–сухий порт». На відміну від традиційного дистанційно-орієнтованого підходу, цей метод використовує реінжиніринг процесів із його економічним оцінюванням на основі погодинного функціонально-вартісного аналізу. Запропоноване рішення, яке передбачає консолідацію вантажів і перенесення митного оформлення до сухого порту, допомагає усунути перевантаження припортової інфраструктури через повторні операції та суттєво скоротити час простою вагонів.

У наукових працях [12, 13] зазначено, що головною перспективою узгодженої роботи станцій є диджиталізація в організації мультимодальних перевезень. Це потребує створення інтегрованого інформаційного простору між усіма учасниками транспортно-логістичного процесу. Проведений критичний аналіз наукових джерел дав змогу виявити нерозв'язану частину проблеми, яка полягає у визначенні інноваційних концепцій диджиталізації для учасників транспортного ринку.

У дослідженні [14] зазначено, що існує значна прогалина в науковій літературі щодо мультимодальних транспортних мереж на основі сухих портів. У роботі розроблено модель змішаного цілочисельного нелінійного програмування, яка інтегрує планування відправлення та попиту вантажів, управління запасами та відставання, урахуваючи доступність видів транспорту в кожному вузлі. Щоб врахувати перебої внаслідок невизначених подій, таких як екстремальні погодні умови, цю модель розширено до двоетапної стохастичної моделі програмування. Стохастична модель урахує невизначеність у доступності видів транспорту, що дає змогу використовувати проактивні та адаптивні стратегії.

Головна проблема, що домінує в дослідженнях, – низька ефективність взаємодії залізничної та портової ланок, яка проявляється в перевантаженні припортових станцій, значних простоях рухомого складу та неузгодженості переробних потужностей станцій і портів. Зокрема, в Україні ця проблема загострена через недостатню ємність колійного розвитку та неефективність маневрових засобів. У контейнерних перевезеннях додаткові труднощі створює складність митних і внутрішньопортових процедур, що призводить до непродуктивного перевантаження.

При цьому в публікаціях сумісну роботу вантажних станцій і місць незагального користування розглядають із позицій максимальної вантажно-вивантажувальної спроможності на вантажних пунктах. У сучасних умовах необхідно враховувати можливості інфраструктури обробляти зростаючі обсяги вантажо- та вагонопотоків, причому з випадковим характером надходження вагонів на станції та обробки їх на вантажних пунктах.

Усувають ці проблеми впровадженням інноваційних технологічних та організаційних рішень. До основних методів належать: 1) реінжиніринг процесів із впровадженням концепції «сухий порт» для консолідації вантажів і винесення митних процедур; 2) застосування методів штучного інтелекту для інтегрованого та динамічного планування маневрових операцій і розподілу ресурсів, що є значним кроком вперед від традиційного планування; 3) імітаційне моделювання для оцінювання переробної спроможності та надійності станцій в умовах стохастичного надходження вагонів, що є критичним для раціонального використання станційної інфраструктури; 4) модернізація інфраструктури та залучення інвестицій через механізми державно-приватного партнерства для подолання дисбалансу потужностей.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Незважаючи на значні успіхи світових наукових досліджень, нерозв'язаними проблемами залишається пошук ефективних форм взаємодії вантажних припортових станцій із морськими портами, збільшення обсягів перевалки вантажів на принципах раціональної організації станційних транспортно-технологічних процесів.

Також актуальним усе ще є подолання законодавчих і регуляторних бар'єрів для повноцінного функціонування та взаємодії різних видів транспорту, практична імплементація розроблених систем підтримки ухвалення рішень, їх інтеграція з існуючими диспетчерськими системами, оптимізація обробки вантажопотоків в умовах фізичних обмежень і зносу станційної інфраструктури. Перспективи подальших досліджень мають включати розроблення методології оцінювання інвестиційних проєктів у припортову інфраструктуру з акцентом на розвиток інтегрованих цифрових платформ для досягнення максимальної узгодженої роботи порту і станції з передавання вагонів.

Формулювання мети.

Метою роботи є підвищення ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та морського порту через урахування рівня використання об'єктів

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

станції та порту для обробки вагонів з експортними вантажами.

повільною перебудовою логістики та переорієнтацією частини вантажів на альтернативні (автомобільні та річкові) маршрути.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Динаміка експортних залізничних перевезень за останні п'ять років (рис. 1) демонструє значні коливання, які відображають вплив глобальних і внутрішніх кризових явищ. Період до 2022 року – це відносна стабільність обсягів, із незначними коливаннями, пов'язаними з пандемією COVID-19 і світовою кон'юнктурою цін на сировинні товари (залізна руда, зерно).

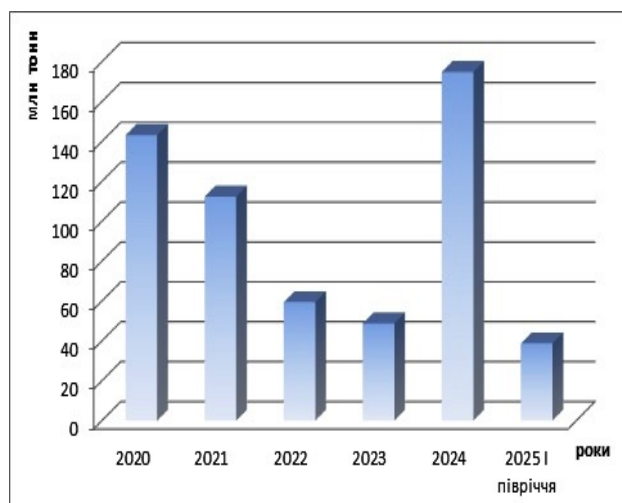


Рис. 1. Динаміка експорту вантажів залізницею

24 лютого 2022 року стало переломним моментом. Обсяги перевезень різко скоротилися внаслідок руйнування інфраструктури, окупації територій, блокування основних морських шляхів і загальної мобілізації економіки. У 2022 році АТ «Укрзалізниця» була змушена виконувати невластиві їй функції – евакуаційні заходи, забезпечення внутрішніх військових і гуманітарних потреб, що позначилося на ефективності вантажних операцій. У 2023 році через адаптацію логістики спостерігали подальше зменшення експортних перевезень залізницею, яке, за офіційними даними, склало близько 5,8 % порівняно з попереднім роком, попри часткову стабілізацію ситуації. Це було пов'язано з

У 2024 і прогнозованому 2025 роках завдяки налагодженню роботи «зернового коридору» та адаптації до нових реалій спостерігали часткове відновлення обсягів. Частка експорту в загальній структурі залізничних перевезень зросла до критичних значень, підкреслюючи їхню незамінність. Проте загальний тоннаж експортних вантажів залишається суттєво нижчим за довоєнний рівень, а ефективність логістики – нижчою через численні нерозв'язані проблеми.

На сьогодні у зв'язку із цифровізацією та інтелектуалізацією транспортно-технологічних процесів наука і практика моделювання залізничних станцій і вузлів переживає новий етап розвитку на принципах формування цифрових моделей транспортних об'єктів.

Для забезпечення конкурентоспроможності залізниці необхідні достатні резерви пропускної спроможності як залізничних дільниць, так і станцій.

Нерівномірність надходження вагонопотоків на припортові залізничні станції (рис. 2) має яскраво виражений імовірнісний характер, що зумовлено великою кількістю факторів, включаючи нерівномірність надання вантажів до перевезень і оснащення вантажних фронтів. Ці коливання потужності вагонопотоків мають значний вплив на технологічні процеси станцій, зокрема параметр накопичення вагонів на сортувальних станціях, нераціональне використання станційної інфраструктури припортових станцій, що може призводити до значних простоїв як вагонів, так і локомотивів. У результаті виникає дисбаланс між пропускною спроможністю припортових станцій і переробною спроможністю портів, що збільшує транспортні витрати та знижує загальну ефективність взаємодії залізничного й морського транспорту. Для забезпечення ритмічності роботи і зменшення негативних наслідків важливим є застосування методів моделювання та оперативного планування, які враховують стохастичність цих процесів.

місяці роки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2024	814,78	798,15	1006,00	1115,75	1249,77	1381,80	1547,99	1779,21	1995,37	2012,00	1978,75	948,55
2023	741,76	809,19	1003,06	1131,18	1216,49	1350,34	1552,55	1803,83	2039,84	2039,84	2006,12	1163,97
2022	1006,08	869,82	1129,27	1271,13	1328,25	1569,78	1741,41	1860,96	2127,88	2258,54	2109,22	1393,30
2021	748,25	719,83	955,04	1059,23	1233,82	1311,80	1469,58	1720,65	1957,44	1910,08	1878,51	821,57
2020	682,26	844,95	988,40	1173,83	1227,36	1453,73	1576,10	1871,84	2099,25	2116,75	2081,76	1377,55
2019	873,96	911,95	1149,44	1274,84	1313,97	1388,83	1768,72	2032,90	2279,89	2298,89	2450,88	1254,79

Рис. 2. Хромакарта перевалки вантажів із залізничного на морський вид транспорту в Одеському морському торговельному порту, тис. т

Як видно з хроматичної карти обсягів перевалки, спостерігають суттєву нерівномірність в обсягах роботи морських портів з експортування вантажів за місяцями року. Зменшення вантажообігу України пов'язане зі скороченням сільгоспугідь і спадом виробництва в експортно орієнтованих галузях, зокрема металургії, яка до війни забезпечувала експорт до 80 % продукції. Також це пов'язано зі спеціалізацією портів за номенклатурою вантажів, що зумовлює появу фактора сезонності в обсягах надходжень. Так, морські порти, значну частину перевалки яких складають зернові вантажі та рослинні жири й олії, мають найбільше завантаження в період збору врожаю і до кінця року, а в портах, спеціалізованих за несезонними вантажами, спостерігають більш рівномірні обсяги експортування протягом року. На глобальному рівні перевалка вантажів знижується через нестабільність ринків і порушення маршрутів логістики.

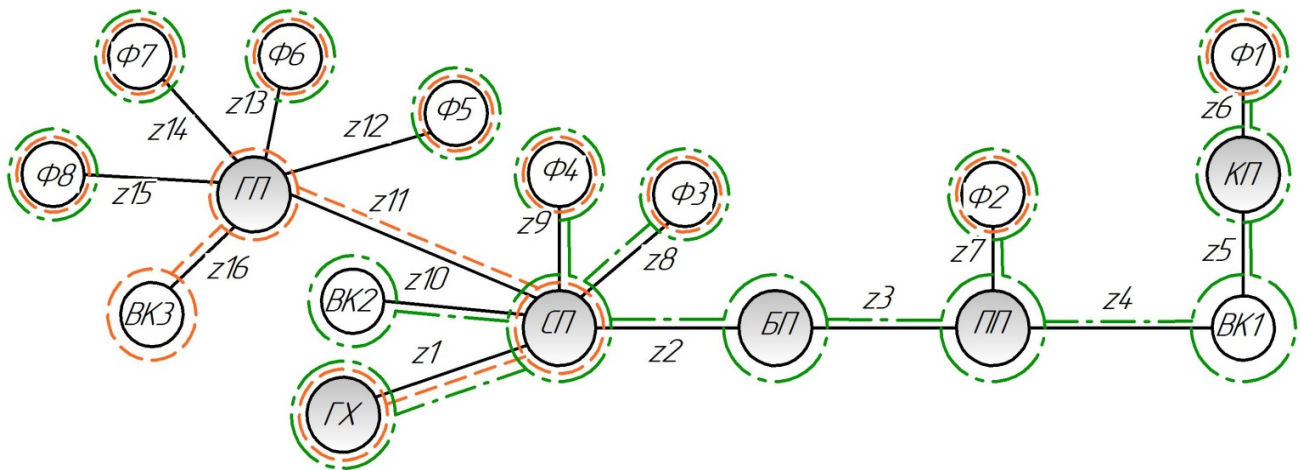


Рис. 3. Схема-граф технологічних переміщень по припортовій вантажній станції та порту

Об'єктами припортової станції та порту прийнято головні колії примикання (ГХ), станційні парки (СП, БП, ГП, ПП, КП), витяжні колії (ВК1, ВК2, ВК3), вантажні фронти причалів порту, на які подають вагони зі станції (Фі), та інші колії (з'єднувальні, виставочні тощо) – зі.

Розглянемо варіанти переміщень вагонів згідно з технологією обробки після прибуття вантажних поїздів різних категорій з експортними вантажами. Для цього виділимо основні технологічні операції, які мають вагоме значення для розв'язання сформованої задачі.

Варіант технологічних переміщень вантажного маршруту (зелена штрих-пунктирна лінія) передбачає, що вантажний поїзд прибуває з перегону по головній колії, ГХ, і буде прийнятий до парку СП. Після обробки вагони розвозять для розвантаження-навантаження на вантажні фронти причалів порту, Фі, і назад. Цією технологічною лінією вагонопотік

Продес перевезення у структурі діяльності припортових вантажних станцій функціонально можна подати як взаємодію станції примикання і місць незагального користування (рис. 3). Описати роботу станції в цілому можна найбільш повно лише у випадку, якщо відомі залежності, що пов'язують окремі елементи системи з початковими умовами, параметрами та змінними. Але не завжди при цьому за допомогою аналітичних формул можна визначити параметри роботи підприємства, оскільки багато з них задані ймовірно й непрогнозовано. Використовуючи математичне моделювання, можна відтворити процес роботи станції примикання та вантажного об'єкта так, що всі елементарні операції виконуватимуться зі збереженням послідовності та часу.

прямує зі станції у порт і назад без додаткових технологічних операцій.

Варіант технологічних переміщень передавального поїзда, що надійшов із суміжної технічної станції (помаранчева пунктирна лінія), передбачає обробку і подальше розформування. У цьому випадку після приймання поїзда в парк СП і проведення технологічних операцій після прибуття состав переставляють у парк ГП, що використовують як сортувальний. Після закінчення розформування проводиться формування подач вагонів на вантажні фронти причалів і їх подальше подавання. При цьому, урахувавши колійний розвиток станції та призначення вагонів, можлива перестановка подач маневровим локомотивом у парки БП, ПП, або КП, через які подачі будуть направлені на відповідні причали.

У таблиці наведено показники використання об'єктів зі схеми-графа. За результатами можна

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

зробити висновок, що найбільш невизначеними в організації технологічного процесу станції об'єктами, а отже, її «вузьким місцем», виявилися витяжні колії, на яких здійснюють операції з перестановки составів поїздів і маневрових передач. Цей результат є очікуваним, урахувавши відсутність гіркового сортувального пристрою на станції та нераціональну

конструкцію горловин станції через її значну протяжність уздовж берегової лінії.

Таблиця

Показники використання об'єктів станції та порту

Інфраструктурний елемент	ГХ	СП	ГП	БП	ПП	КП	ВК1	ВК2	ВК3	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8
Імовірність завантаження елемента	0,31	0,86	0,91	0,65	0,69	0,45	0,33	0,40	0,85	0,03	0,12	0,27	0,08	0,06	0,20	0,40	0,53
Резерв вільності елемента, %	69	14	9	35	31	55	67	60	15	97	88	73	92	94	80	60	47
Ентропія елемента	0,36	0,13	0,09	0,28	0,26	0,36	0,37	0,37	0,14	0,11	0,25	0,35	0,20	0,17	0,32	0,37	0,34
Відносна організація елемента	0,67	0,87	0,91	0,72	0,74	0,64	0,63	0,63	0,86	0,89	0,75	0,65	0,80	0,83	0,68	0,63	0,66

Як оцінку ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та порту прийнято часову параметризацію станційних технологічних процесів під час обробки експортних вагонопотоків.

На сформованій схемі-графі станції з m елементів інфраструктури виділено n технологічних операцій з обробки вагонів. Позначимо через $A_{mn} = \{t_{mn} | \gamma_A(t_{mn})\}$ технологію роботи об'єктів станції й порту і їх тривалість зайняття. При цьому γ_A – частка належності t_{mn} у A_{mn} .

Усі вагони, що прибувають на станцію, мають бути перероблені в системі без наднормативних простоїв і відставлення від руху, тоді буде виконана нерівність

$$\sum_{i=1}^p V_i \leq \sum_{j=1}^q b_j, \quad (1)$$

де V_i – кількість вагонів, що прибувають на станцію за одиницю часу;

b_j – кількість вагонів, які станція може переробити за одиницю часу за умови максимального забезпечення технічних потужностей і мінімального простою на об'єктах станції та порту.

Нехай x_{ij} – це кількість вагонів за варіантом організації технологічних процесів, які можуть бути спрямовані з об'єкта станції на об'єкт порту (вантажний фронт) у множині допустимих варіантів за таких умов:

а) усі заплановані до подавання у порт вагони з експортними вантажами мають бути організовані та виконані;

б) сумарна кількість переданих у порт вагонів не має бути більше, ніж та, що може бути перероблена.

Множина варіантів взаємодії об'єктів припортової станції та порту, що забезпечують раціональний варіант організації технологічних процесів, має включати набір послідовності використання об'єктів станції для кожного варіанта технологічних маршрутів із визначеною кількістю вагонів і тривалістю зайняття елементів, забезпечуючи загальний мінімум часу простою вагонів.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, із позиції сформованої задачі дослідження, цільова функція мінімізації тривалості простою вагонів з експортними вантажами, T , набуває вигляду

$$T = f(x_{ij}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{m=1}^v \sum_{n=1}^w \{t_{ij}, x_{ij}, A_{mn} | \gamma_A(s_m)\} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де t_{ij} – тривалість зайняття j -го об'єкта станції з виконанням на ньому i -ї технологічної операції серед n можливих з обслуговування вагонів з експортними вантажами, год;

x_{ij} – кількість вагонів, що обробляють на j -му об'єкті з виконанням i -ї технологічної операції;

A_{mn} – множина варіантів виконання технологічної роботи з обслуговування вагонів на m об'єктах;

$\gamma_A(s_m)$ – частка використання технологічного елемента s_m на схемі у послідовності блоків управління вибраної підмножини варіантів A_{ij} .

Множина можливих технологічних операцій з обслуговування вагонопотоку на припортовій станції, A_{mn} , включає набір послідовностей елементів схеми-графа для кожного варіанта, визначену кількість вагонів і тривалість зайняття елементів з урахуванням рішення про їх застосування за загального мінімуму простою вагонів.

Параметром керування є кількість вагонів, x_{ij} , що буде обслужена на кожному об'єкті станції і порту з виконанням технологічних операцій. Обмеження, що накладені на розв'язання задачі:

1) увесь вагонопотік, що надходить на станцію за розрахунковий період, має бути обслужений:

$$\sum_{i=1}^p x_i = V, \quad (3)$$

де V – кількість вагонів з експортними вантажами, що надходить на станцію за розрахунковий період;

2) кількість вагонів, що обслуговують, не має перевищувати їхню технічну можливість за розрахункову одиницю часу:

$$x_i \leq b_i; \quad (4)$$

3) тривалість обслуговування вагонів на кожному об'єкті не має перевищувати допустимих технологічних норм:

$$t_{ij} \leq t_{ij}^{\max}; \quad (5)$$

4) цілочисельність параметра керування x_{ij} , зважаючи на його сутність,

$$x_{ij} \in Z, \quad (6)$$

де Z – множина натуральних чисел.

Отже, математична модель за критерієм мінімізації простою вагонів з експортними вантажами на припортовій вантажній станції має систему обмежень

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_i = V; \\ x_i \leq b_i; \\ t_{ij} \leq t_{ij}^{\max}; \\ x_i \in Z. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язком поставленої оптимізаційної задачі є той варіант виконання технологічного процесу, за якого сумарний час зайняття всіх об'єктів станції не перевищує тривалість усіх можливих варіантів технологічних ліній із забезпеченням обробки всього обсягу вагонопотоків, що надходить.

Наведемо вирази для розрахунку тривалості обслуговування вагонопотоків на об'єктах станції. Загальний простій вагонів з експортними вантажами на припортовій станції, T , складається з таких елементів:

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$T = t_{np} + t_{nep} + t_{p-\phi} + t_{nod}, \quad (8)$$

де t_{np} – тривалість проведення технологічних операцій із приймання поїзда, год;

t_{nep} – час на перестановку состава з колій приймання на сортувальні колії станції, год;

$t_{p-\phi}$ – тривалість розформування состава і формування подач вагонів на вантажні фронти, год;

t_{nod} – час на подавання-забирання вагонів на вантажні фронти причалів, год.

Тривалість проведення технологічних операцій із приймання поїзда в загальному вигляді включає час на приймання поїзда, закріплення состава, отримання пакета поїзних документів, забирання локомотива, огороження колії, а також проведення технічного та комерційного огляду на приймально-відправній колії.

За технологією роботи станції, за відсутності гіркового сортувального пристрою розформування составів здійснюють на витяжних коліях, що примикають до сортувального парку ГП. Час на перестановку состава з колій приймання на сортувальні колії парку ГП для подальшого проведення на них розформування визначають, розраховуючи тривалість маневрових напіврейсів з урахуванням колійного розвитку станції та приведених уклонів.

Час на подавання-забирання груп вагонів на вантажні фронти причалів залежить від кількості вантажних фронтів, кількості подач на адресу цих фронтів, величини самих подач і розташування вантажних фронтів відносно сортувального парку. Визначаючи цю величину, доцільно врахувати те, що

тривалість напіврейсів у такому випадку має враховувати час на розгін-уповільнення і простій через ворожість маршрутів по станції. Для технологічного нормування застосовують формулу

$$t_{nod} = \frac{(\alpha_{py} + \beta_{py} \cdot n) \cdot v_m}{2} + \frac{0,06 \cdot L_{nep}}{v_m}, \quad (9)$$

де α_{py} – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості руху локомотива на 1 км/год із розгоном та уповільненням руху;

β_{py} – коефіцієнт урахування додаткового часу на зміну швидкості руху кожного вагона в маневровому составі на 1 км/год із розгоном та уповільненням руху;

v_m – допустима швидкість руху маневрового состава, км/год;

L_{nep} – довжина перестановки, м.

Для визначення часу на подавання груп вагонів на вантажні фронти причалів і виявлення ступеня впливу на цю величину кількісних показників роботи припортової станції було проведено статистичне моделювання.

У результаті з достовірністю апроксимації близько 93 % було отримано лінійну залежність цієї величини від параметра керування – кількості вагонів, що подають на вантажні фронти причалів з об'єктів станції – паркових колій. Отже, у цільову функцію включений фактор впливу, який має стохастичний зв'язок між значеннями результативної та факторної ознак. На рис. 4 подана графічна інтерпретація результатів моделювання.

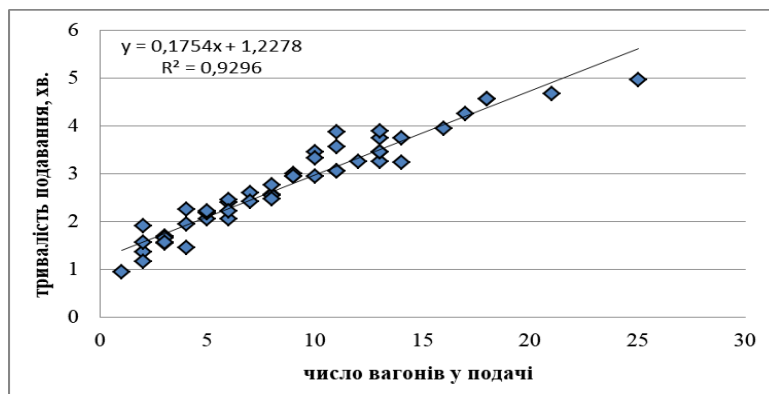


Рис. 4. Результати статистичного моделювання процесу подавання вагонів на вантажні фронти причалів

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Формалізована задача мінімізації простою вагонів з експортними вантажами на припортовій станції належить до задачі динамічного програмування з системою лінійних обмежень. Реалізовано моделювання у програмному середовищі Python.

Для кожної комбінації кількості вагонів на коліях і вантажних фронтах обчислювали:

- середній час простою вагонів T_{idle} ;
- стандартне відхилення часу простою $\sigma_{T_{idle}}$;
- довірчий інтервал 95 % для середнього часу простою.

Наведемо отримані результати у вигляді графічної залежності середнього простою вагонів на припортовій станції від кількості вагонів, що знаходяться на станційних коліях і вантажних фронтах (рис. 5).

Отримано залежність середнього часу простою від кількості вагонів на коліях і вантажних фронтах. Збільшення кількості вагонів на коліях у певному діапазоні призводить до зростання часу простою через обмеженість обробної потужності. Зменшення кількості вагонів нижче оптимального рівня знижує ефективність використання інфраструктури, а перевищення оптимальної кількості призводить до заторів і тривалого простою.

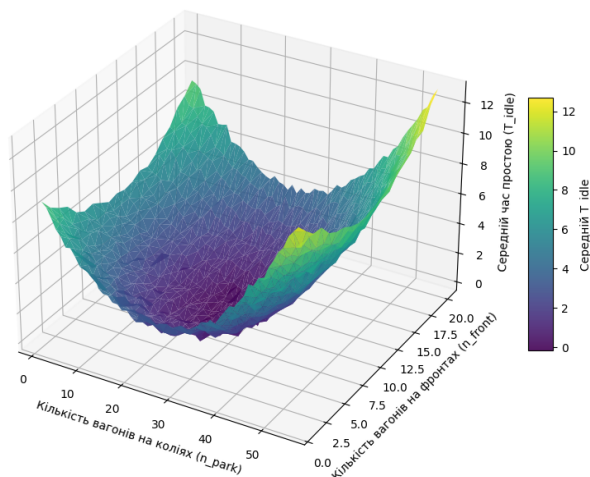


Рис. 5. Графічна інтерпретація результатів математичного моделювання

У результаті роботи програми отримано більше 50 варіантів значень загального простою за варіантом обробки вагонів, що надійшли маршрутами. Мінімальний час загального простою вагонів з експортними вантажами на станції склав 27,7 год. Програма дає змогу враховувати стохастичні фактори, що мають вплив на тривалість простоїв вагонів на станції.

Для кожної комбінації кількості вагонів було обчислено довірчі інтервали 95 % для середнього часу простою. Довірчі інтервали підтвердили стійкість середніх значень, оскільки більшість значень часу простою не виходила за межі ± 10 % середнього за кількості реплікацій 300. Це свідчить, що модель досить надійно відображає реальні процеси обробки вагонів на припортових станціях і допомагає визначити оптимальні параметри завантаження інфраструктури.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень.

Застосування сформованої математичної моделі на практиці дасть змогу скоротити непродуктивні простой вагонів з експортними вантажами в місцях стикування залізничного і морського видів транспорту, зменшити завантаження інфраструктурних елементів припортових станцій за рахунок раціонального розподілу вагонів із виконанням технологічних операцій і, як наслідок, збільшити їхню пропускну та переробну спроможність. Універсальність моделі полягає в можливості застосування її з використання елементів схеми-графа станції для організації роботи припортових станцій і формування послідовності управлінських рішень для конкретних станцій та умов експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів:

- планування подавання вагонів на станції для зменшення їхніх простоїв;
- розроблення алгоритмів управління чергою вагонів на фронтах причалів;
- ухвалення рішень про оптимальну кількість вагонів на коліях для ефективної роботи причалів.

Отже, розроблена стохастична математична модель описує процес обробки експортних вагонів на припортових станціях. Модель дає змогу прогнозувати середній час простою вагонів за різних варіантів подавання вагонів на вантажні fronti і на коліях станції, урахувати випадковість подавання вагонів, оцінювати ефективність станційної інфраструктури і прогнозувати середній час простою. Результати моделювання можна використовувати для прогнозування та оптимізації логістичних процесів на припортових станціях, зменшення завантаженості пристроїв і підвищення переробної спроможності безгіркових станцій.

Список використаних джерел

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

1. Gao P., Zheng W., Liu J., Wu D. Identification of Critical Track Sections in a Railway Station Using a Multiplex Networks Approach. *Mathematics*. 2025. 13. 1151. <https://doi.org/10.3390/math13071151>.
2. Wang C., Xia Y., Zhu L. A Method for Identifying the Important Node in Multi-Layer Logistic Networks. *Front. Phys.* 2022. 10. 968645. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.968645>.
3. Baulina H., Bohomazova H., Prodashchuk S. Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*. 2023. 14. 400-414. <https://doi.org/10.46925/rdluz.39.22>.
4. Kurnia G., Adzkie H., Rachmawati N. Dry Port Location Selection: A Case Study of Tanjung Intan Port. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*. 2023. 2. 45-58. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i1.53>.
5. Kobulov J., Shermatov E., Saidivaliev Sh., Sattorov S., Barotov J. Overdue waiting of wagons on railway branch tracks: problems and solutions. *E3S Web of Conferences*. 2024. 515. 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451503008>.
6. Xusanov S., Qobulov J., Samikova D. The sorting hump is a «drawing-analytical» method in finding the coordinates of the elements of the Strait. *E3S Web of Conferences*. 2023. 431. 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105001>.
7. Gryshchuk O., Petryk A., Kopiak N., Litus T. Transport and logistics service of foreign trade cargo flows in integrated production systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. 390. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003002>.
8. Kavička A., Krýže P. Dynamic Automated Search of Shunting Routes Within Mesoscopic Rail-Traffic Simulators. *J. Adv. Transp.* 2021. 8840516. <https://doi.org/10.1155/2021/8840516>.
9. Jarašūnienė A., Savickė E. Application of Quality Criteria in the Development of Partial Load Transportation. 2022. https://doi.org/10.1051/10.1007/978-3-030-94774-3_50.
10. Wu Y., He S., Long Z., Tang H. Integrated Operations Scheduling and Resource Allocation at Heavy Haul Railway Port Stations: A Collaborative Dual-Agent Actor-Critic Reinforcement Learning Framework. *Systems*. 2025. 13. 762. <https://doi.org/10.3390/systems13090762>.
11. Caballini C., Ghiara H., Gommellini G. From a Distance to a Process Perspective: A Method For Assessing the Feasibility of a Port-Dry Port System. *Applied Sciences*. 2025. 15(21):11715. <https://doi.org/10.3390/app152111715>.
12. Zapara Ya., Nechyporuk A., Kotova M., Mazhnyk L., Panchenko V., Vasylenko I. Innovative concepts of digitisation and digitalisation in the multimodal transportation organisation. *E3S Web of Conferences*. 621. 03014 (2025). ICGEST 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562103014>.
13. Attaran M. Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*. 2020. 21. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>.
14. Zhang X., Guo G., Irawan C.A., Chan H.K., Zeng F., Gu X. Tactical and operational planning of resilient multimodal dry port transportation network. *Industrial Management & Data Systems*. 2025. P. 1-31. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2025-0096>.

References

- Gao, P., Zheng, W., Liu, J., & Wu, D. (2025).** Identification of critical track sections in a railway station using a multiplex networks approach. *Mathematics*, 13, Article 1151. <https://doi.org/10.3390/math13071151>
- Wang, C., Xia, Y., & Zhu, L. (2022).** A method for identifying the important node in multi-layer logistic networks. *Frontiers in Physics*, 10, Article 968645. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.968645>
- Baulina, H., Bohomazova, H., & Prodashchuk, S. (2023).** Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*, 14, 400-414. <https://doi.org/10.46925/rdluz.39.22>
- Kurnia, G., Adzkie, H., & Rachmawati, N. (2023).** Dry port location selection: A case study of Tanjung Intan port. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 2, 45-58. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i1.53>
- Kobulov, J., Shermatov, E., Saidivaliev, S., Sattorov, S., & Barotov, J. (2024).** Overdue waiting of wagons on railway branch tracks: Problems and solutions. *E3S Web of Conferences*, 515, Article 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451503008>
- Xusanov, S., Qobulov, J., & Samikova, D. (2023).** The sorting hump is a «drawing-analytical» method in finding the coordinates of the elements of the strait. *E3S Web of Conferences*, 431, Article 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105001>
- Gryshchuk, O., Petryk, A., Kopiak, N., & Litus, T. (2024).** Transport and logistics service of foreign trade cargo flows in integrated production systems. *MATEC Web of Conferences*, 390, Article

03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003002>
8. Kavička, A., & Krýže, P. (2021). Dynamic automated search of shunting routes within mesoscopic rail-traffic simulators. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Article 8840516. <https://doi.org/10.1155/2021/8840516>
 9. Jarašūnienė, A., & Savickė, E. (2022). Application of quality criteria in the development of partial load transportation. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_50
 10. Wu, Y., He, S., Long, Z., & Tang, H. (2025). Integrated operations scheduling and resource allocation at heavy haul railway port stations: A collaborative dual-agent actor-critic reinforcement learning framework. *Systems*, 13, Article 762. <https://doi.org/10.3390/systems13090762>
 11. Caballini, C., Ghiara, H., & Gommellini, G. (2025). From a distance to a process perspective: A method for assessing the feasibility of a port-dry port system. *Applied Sciences*, 15(21), Article 11715. <https://doi.org/10.3390/app152111715>
 12. Zapara, Y., Nechyporuk, A., Kotova, M., Mazhnyk, L., Panchenko, V., & Vasylenko, I. (2025). Innovative concepts of digitisation and digitalisation in the multimodal transportation organisation. *E3S Web of Conferences*, 621, Article 03014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562103014>
 13. Attaran, M. (2020). Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>
 14. Zhang, X., Guo, G., Irawan, C. A., Chan, H. K., Zeng, F., & Gu, X. (2025). Tactical and operational planning of resilient multimodal dry port transportation network. *Industrial Management & Data Systems*, 1-31. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2025-0096>
- implementation of innovative technological and organizational solutions. The process of handling export wagon flows at the station is formalized with consideration of minimizing wagon dwell time while awaiting technological operations. The developed mathematical model makes it possible to account for the stochastic nature of the delivery of local wagons with export cargoes to the port, evaluate the efficiency of using port station and port infrastructure facilities, and forecast the average dwell time of local wagons.*
- To determine the time required for delivering groups of wagons to the berth cargo fronts and to identify the extent to which quantitative performance indicators of the port-adjacent station influence this parameter, statistical modeling was carried out. A relationship has been obtained between the average dwell time and the number of wagons on the tracks and at the cargo fronts.*
- The practical significance of the obtained results lies in planning wagon delivery at the station to reduce dwell times, developing algorithms for managing wagon queues at berth fronts, and supporting decision-making regarding the optimal number of wagons on the tracks to ensure efficient operation of both the station and the port.*

Keywords: port stations, wagon delivery, local wagon dwell time, export wagon flows.

Шелехань Ганна Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6640-6084>. Тел.: +38 (066) 141-54-05. E-mail: shelekhan@kart.edu.ua.

Погорелов Віталій Вадимович, магістр, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 313-93-10. E-mail: pogorelovv@kart.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0009-0008-9144-1667>

Shelekhan Hanna Ihorivna, Cand. Tech. Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Railway Stations and Nodes, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-6640-6084>. Tel.: +38 (066) 141-54-05. Email: shelekhan@kart.edu.ua.

Pogorelov Vitalii Vadimovych, Magister student, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 313-93-10. E-mail: pogorelovv@kart.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0009-0008-9144-1667>

Стаття надійшла 12.12.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 18.01.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

Hanna Shelekhan, Vitalii Pogorelov

ENHANCING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN PORT RAILWAY STATION AND THE SEAPORT

Abstract. *The article analyzes the current state and operating conditions of a port-adjacent freight station from the standpoint of the efficiency of its interaction with the seaport in processing wagon flows carrying export cargoes. The analysis of contemporary Ukrainian and world scientific and research studies devoted to this issue made it possible to identify the key aspects of improving the efficiency of railway infrastructure operation, including advanced technological solutions, optimization of technical and technological processes, enhancement of handling capacity, and reduction of rolling-stock dwell time. Existing problems are addressed through the*

УДК 625.14

DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i1.357615>

Муригіна Н.О., PhD, ст. викл.
Малішевська А.С., канд. техн. наук, доцент
Бугаєць Н.В., канд. техн. наук, доцент
Тертичний В.В., аспірант.

Критерії для призначення ремонту з оновлення верхньої будови безстикової колії

Анотація. У статті запропоновані чисельні значення основних критеріїв щодо призначення ремонту з оновлення верхньої будови безстикової колії, які встановлені на основі аналізу зміни надійності рейко-шпальної решітки в процесі експлуатації.

У якості основних критеріїв розглядаються пропущений тоннаж (строк служби у роках) та поодинокий вихід рейок за дефектами у період експлуатації колії.

Запропоновані математичні моделі для визначення: ймовірність появи відмов рейок, залізобетонних шпал та проміжних скріплень типу КБ в залежності від напрацьованого тоннажу.

Ключові слова: безстикова колія, верхня будова колії, модернізація колії, капітальний ремонт колії, критерії призначення, рейко-шпальна решітка, напрацьований тоннаж.

Вступ.

Безстикова колія є однією з найсучасніших конструкцій колій у світі. Це основний тип колійної конструкції, що використовується на магістральних лініях у Європі, Північній Америці, Китаї, СНД та інших регіонах. Застосування безстикової колії забезпечує високі швидкості та здатність витримувати великі осьові навантаження. У порівнянні зі ланковою колією вона зменшує обсяг необхідних колійних робіт. При її укладанні потрібно менше металомістких скріплень. Вона має мінімальну кількість стиків, які є найуразливішими та найбільш напруженими ділянками, а також основним місцем накопичення залишкових деформацій. Безстикова колія допомагає зменшити питомий опір коченню, призводить до зменшення зносу коліс, збільшує пропускну здатність за рахунок підвищення швидкості поїздів та скорочує витрати на паливо та електроенергію. Крім того, рівень шуму на безстиковій колії знижується на 15 децибел, а комфорт їзди покращується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

«Правила технічної експлуатації залізниць України» вимагають, що «усі елементи залізничної колії за станом мають забезпечувати безпечний і плавний рух поїздів із швидкостями, встановленими на даній ділянці».

У роботі [1] наданий аналіз сучасної нормативної бази з основних організаційно-технічних заходів з ремонтів залізничної колії на залізницях України. Де, зокрема, у якості основних критеріїв для призначення ремонту з оновлення верхньої будови колії (ВБК) розглядаються:

- пропущений тоннаж (строк служби у роках),
% від нормативного;

- поодинокий вихід (за період експлуатації ВБК) рейок за дефектами (для безстикової колії – кількість дефектних місць в межах рейкової пліти) – m_p , шт/км.

Визначення мети та завдання дослідження.

На залізницях України основною конструкцією ВБК є безстикова колія, що експлуатується майже на 75% розгорнутої довжини головної колії. При цьому переважає конструкція безстикової колії з такими характеристиками: рейкові пліти зварені з термозміцнених рейок типу Р65, залізобетонні шпали епюрою 1840 шт/км, проміжне скріплення типу КБ, щебеневий баласт.

Оновлення ВБК на ділянці залізниці здійснюється під час виконання капітальних ремонтів колії із використанням нових чи старопридатних матеріалів ВБК. У якості ведучої роботи при цих ремонтах розглядається повна заміна рейко-шпальної решітки, що виробила свій ресурс.

Основною метою та завданням виступає визначенні надійності конструкції рейко-шпальної решітки безстикової колії при напрацьованні тоннажу.

Нижче наводяться результати досліджень з визначення чисельних значень показника m_p , які ґрунтуються на оцінці надійності рейко-шпальної решітки в процесі експлуатації.

Основна частина дослідження.

Для оцінки надійності рейко-шпальної решітки (РШР) використовується ймовірність безвідмовної роботи конструкції $P_{РШР}(t_i)$, значення якої у конкретний момент часу t_i (після напрацювання певного тоннажу T_i , млн. т бруто) визначається за формулою:

$$P_{РШР}(t_i) = P_p(t_i) P_{шп}(t_i) P_{скр}(t_i), \quad (1)$$

ІНФОРМАЦІЙНО – КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

де $P_p(t_i)$, $P_{шп}(t_i)$, $P_{скр}(t_i)$ – ймовірність безвідмовної роботи (на момент часу t_i) відповідно рейок, шпал та проміжних скріплень.

На практиці для оцінки надійності j -го елемента у деяких випадках доцільно застосовувати таку характеристику як ймовірність появи його відмови $F_j(t_i)$:

$$F_j(t_i) = 1 - P_j(t_i), \tag{2}$$

де j – елемент РШР (рейки, шпали, проміжне скріплення).

Оцінка надійності рейкових плітей безстикової колії в процесі експлуатації передбачає умовний їх поділ на відрізки довжиною 12,5 м. Рейки зрівнювальних прольотів з розгляду виключаються.

У роботі [2] наведена залежність показника m_p (штук/км) від напрацьованого тоннажу T , млн. т бруто (для ділянок з середнє зваженим осьовим навантаженням 155 кН та швидкістю руху поїздів 100 км/година):

$$m_p = 0,56 \cdot 10^{-8} T^3. \tag{3}$$

Ймовірність появи відмов рейок в процесі експлуатації визначається за формулою:

$$F_p(t_i) = m_p(t_i) / N_p, \tag{4}$$

де N_p – кількість умовних рейок довжиною 12,5 м на 1 км колії.

У даному випадку цей показник становить:

$$F_p(t_i) = 0,35 \cdot 10^{-10} T^3. \tag{5}$$

Дослідженнями [3] (для сучасних умов експлуатації колії) встановлено допустимий (з умови економічно-раціональної роботи рейок) рівень сумарного поодинокого виходу рейок у дефектні $[m_p]$ для ділянок з відповідною вантажонапруженістю Γ :
 $\Gamma=30$ млн. ткм бруто/км за рік - $[m_p]=8$ штук/км;
 $\Gamma=50$ млн. ткм бруто/км за рік - $[m_p]=6,5$ штук/км;
 $\Gamma=80$ млн. ткм бруто/км за рік - $[m_p]=5,6$ штук/км;

Таблиця 1

Залежність елементів РШР від пропущеного тоннажу протягом «життєвого» циклу ВБК

T, млн. т	100	200	300	400	500	600	700	800
$P_p(t_i)$	0,99996	0,99972	0,99905	0,99776	0,99562	0,99244	0,98700	0,98208
$P_{шп}(t_i)$	0,99999	0,99997	0,99993	0,99987	0,99980	0,99972	0,99961	0,99949
$P_{скр}(t_i)$	0,9972	0,9774	0,9236	0,8189	0,9236	0,8189	0,9236	0,8189
$P_{РШР}(t_i)$	0,9972	0,9771	0,9227	0,8170	0,9194	0,8125	0,9112	0,8038

Аналіз результатів таблиці 1 дозволяє відмітити, що імовірність безвідмовної роботи РШР в процесі її експлуатації (при напрацьованні тоннажу) змінюється від 1,0 до 0,8 (при умові, що протягом «життєвого» циклу ВБК на ділянці виконуються своєчасно роботи по заміні непридатних шпал та елементів скріплень).

У таблиці 2 наведені чисельні значення основних критеріїв щодо призначення ремонту з

Обробка цих даних дозволила визначити відповідну залежність $[m_p]=f(\Gamma)$, яка описується рівнянням:

$$[m_p]=0,0009 \Gamma^2 - 0,147\Gamma + 11,6 \tag{6}$$

Таким чином, величина m_p може знаходитися в межах 3÷11 шт/км залежно від параметра Γ , тобто від категорії колії.

Залежність сумарного виходу залізобетонних шпал за дефектами $m_{шп}$ (штук/км) в процесі експлуатації безстикової колії (з рейковими плітями довжиною 650м) відповідає наступній математичній моделі [2]:

$$m_{шп} = 0,146 \cdot 10^{-5} T^2. \tag{7}$$

Ймовірність появи відмов шпал (для даної конструкції РШР) при напрацьованні тоннажу відповідає математичній моделі

$$F_{шп}(t_i) = 7,93 \cdot 10^{-10} T^2. \tag{8}$$

У роботі [4] визначені такі математичні моделі для оцінки:

ймовірності появи відмов проміжного скріплення типу КБ (епюра шпал 1840 шт/км) при напрацьованні тоннажу

$$F_{КБ}(t_i) = 28,3 \cdot 10^{-10} T^3, \tag{9}$$

сумарного виходу за дефектами вузлів проміжного скріплення типу КБ в процесі експлуатації

$$m_{КБ} = 10,4 \cdot 10^{-6} T^3. \tag{10}$$

У таблиці 1 наведені значення показників $P_p(t_i)$, $P_{шп}(t_i)$ та $P_{скр}(t_i)$ залежно від T для випадку, коли на ділянці (1км колії) протягом «життєвого» циклу ВБК виконуються роботи по заміні непридатних шпал та елементів скріплень.

оновлення верхньої будови безстикової колії, які встановлені на основі аналізу зміни надійності РШР при напрацьованні тоннажу.

Таблиця 2

Основні критерії призначення ремонту з оновлення верхньої будови безстикової колії

Категорія колії	Основні критерії		Вид ремонту
	Пропущений тоннаж (строк служби у роках), % від нормативного (не менше)	Поодинокий вихід рейок (кількість дефектних місць) у сумі з моменту укладання у колію (в середньому на ділянці), штук/км	
I – III	100	3 та більше	Капітальний ремонт колії
IV	100	4 та більше	
V – VI	100	8 та більше	Капітальний ремонт колії із використанням старопридатних матеріалів ВБК.
VII	100	10 та більше	

Примітки до таблиці 2: Нормативний тоннаж (нормативний строк служби рейок) встановлюється згідно [5].

Висновки.

У статті запропоновані чисельні значення основних критеріїв щодо призначення ремонту з оновлення верхньої будови безстыкової колії, які встановлені на основі аналізу зміни надійності рейкошпальної решітки в процесі експлуатації.

Імовірність безвідмовної роботи рейкошпальної решітки в процесі експлуатації (при напрацюванні тоннажу) змінюється від 1,0 до 0,8 за умови, що протягом «життєвого» циклу ВБК на ділянці виконуються своєчасно роботи по заміні непридатних шпал та елементів скріплення).

Список використаних джерел

1. Штомпель А.М., Малішевська А.С., Мурігіна Н.О. Нормативна база для призначення ремонтів колії на залізницях України *Sworld 2* (2019) 25-30. DOI: 10.30888/2663-5720.2019-02-01-002.

2. Штомпель А.М., Носенко Б.В., Стомін Т.Ю. Обсяги залізничних перевезень та вихід у дефектні елементів верхньої будови безстыкової колії *Науковий погляд в майбутнє* 2(2)(1) (2016) 72-75.

3. Баль О.М. Підвищення ефективності ведення рейкового господарства за показниками надійності. Автореф. Дис... к.т.н. ДНУЗТ, Дніпропетровськ (2008) 25 с.

4. Штомпель А.М. Вплив поїзного навантаження на змінення рівня надійності верхньої будови безстыкової колії *Sworld* 48(1) (2017) 73-77.

5. ДБН В.2.3. – 19:2025 Залізничі колії 1520 мм Норми проектування. Київ (2025) 123с.

References

1. **Shtompel, A. M., Malishevskaya, A. S., & Murygina, N. O. (2019).** Normativna baza dlia pryznachennia remontiv kolii na zaliznytsiakh

Ukrainy [Normative base for scheduling track repairs on the railways of Ukraine]. *Sworld*, (2), 25-30. <https://doi.org/10.30888/2663-5720.2019-02-01-002> [in Ukrainian].

2. **Shtompel, A. M., Nosenko, B. V., & Stomin, T. Yu. (2016).** Obsiahy zaliznychnykh perevezen ta vykhid u defektni elementiv verkhnoi budovy bezstykovoi kolii [Volumes of railway transportation and failure of track superstructure elements of continuous welded track]. *Naukovyi pohliad v maibutnie*, 2(2(1)), 72-75 [in Ukrainian].

3. **Bal, O. M. (2008).** Pidvyshchennia efektyvnosti vedennia reikovooho hospodarstva za pokaznykamy nadiinosti [Improving the efficiency of rail management based on reliability indicators] [Unpublished doctoral dissertation abstract]. DNUZT [in Ukrainian].

4. **Shtompel, A. M. (2017).** Vplyv poiznoho navantazhennia na zminennia rivnia nadiinosti verkhnoi budovy bezstykovoi kolii [The impact of train load on the change in the reliability level of the continuous welded track superstructure]. *Sworld*, 48(1), 73-77 [in Ukrainian].

5. **DBN V.2.3 – 19:2025. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proiektuvannia [SBN V.2.3 – 19:2025. Railways of 1520 mm gauge. Design standards]. (2025).** [in Ukrainian].

Мурігіна Надія Олександрівна, PhD (Tech.), старший викладач, кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua

Малішевська Аліна Сергіївна, к.т.н., доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691. E-mail: kttolik@gmail.com

Бугаєць Наталя Володимирівна, к.т.н., доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-8322-6501. E-mail: bugaetsn@kart.edu.ua

Тертичний Віталій Вікторович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD 0009-0002-9025-6546. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua

THE MAIN CRITERIA FOR THE APPOINTMENT OF REPAIR TO UPDATE THE UPPER STRUCTURE OF THE CONTINUOUS WELDED TRACK

PhD (Tech) Murygina N.O., PhD (Tech) Malishevskaya A.S., PhD (Tech) Bugaets N.V.

Abstract. Continuous welded rail is one of the most advanced track designs in the world. It is the primary type of track construction used on main lines in Europe, North America, China, the CIS and other regions. The use of this track design enables high speeds and the ability to withstand high axle loads. Compared to jointed track, it reduces the volume of trackwork required. Fewer metal-intensive rail fastenings are needed for its installation. It has a minimum number of joints, which are the weakest and most stressed points, as well as the primary location for the accumulation of residual deformations. Continuous welded track helps reduce specific rolling resistance, leads to reduced wheel wear, increases capacity by raising train speeds, and cuts fuel and electricity costs. Furthermore, noise levels on continuous welded track are reduced by up to 15 decibels, and ride comfort is improved.

During operation, various deviations from track maintenance standards accumulate in the track, which may subsequently lead to track failures.

To ensure the safety of train operations, it is essential to minimise the risk of sudden failures resulting from a loss of stability. An important approach to addressing this issue is monitoring the condition of the track, assessing the stability margin for the current actual condition by analysing the factors affecting the normal operation of continuous welded track. The terminology and definitions of key reliability concepts for use in science and engineering are established by current standards.

Reliability is the property of the track superstructure to perform specified functions (allowing trains to pass) whilst maintaining performance indicators within specified limits over the required time intervals or operating hours in million gross tonnes.

The article proposes numerical values for the main criteria for determining the need for renewal of the superstructure of continuous-welded track, which are established on the basis of an analysis of changes in the reliability of the rail-sleeper grid during operation.

The main criteria considered are the tonnage passed (service life in years) and the isolated failure of rails due to defects during the track's operational period.

Mathematical models are proposed to determine: the probability of failure of rails, reinforced concrete sleepers and KB-type intermediate fastenings depending on the tonnage worked

Mathematical models are proposed to determine: the probability of failure of rails, reinforced concrete sleepers and KB-type intermediate fastenings as a function of accumulated tonnage.

Keywords: non-stick track, top track structure, track modernization, track overhaul, design criteria, sleeper rack, tonnage worked.

Murygina Nadiia, PhD (Tech). Senior lecturer of the Department "Railway tracks and transportation infrastructure", Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua

Malishevskaya Alina, PhD (Tech), Associate Professor, Department "Railway tracks and transportation infrastructure", Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691. E-mail: kttolik@gmail.com

Bugaets Natalia, PhD (Tech), Associate Professor, Department "Railway tracks and transportation infrastructure", Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-8322-6501. E-mail: bugaetsn@kart.edu.ua

Tertychnyi Vitalii, postgraduate student of railway track and transport facilities department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD 0009-0002-9025-6546. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua

Стаття надійшла 03.12.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 02.02.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

КОВАЛЬОВ В. М., к.т.н., доцент,

(Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут")

Дослідження впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії тягових двигунів постійного струму

У статті проведений аналіз впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії (ККД) тягових двигунів постійного струму. Отриманий аналітичний вираз для розрахунку ККД тягових двигунів постійного струму магістральних електровозів при їх живленні від однофазних напівкерованих тиристорних випрямлячів. Визначений кількісний вплив гармонік струму якоря на ККД двигуна. Методика визначення ККД ґрунтується на законі збереження енергії, методі гармонійного аналізу, методах з теорії електричних машин та комп'ютерного моделювання. В результаті проведених досліджень удосконалений аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча з урахуванням коефіцієнта пульсацій струму. На комп'ютерній моделі отримані експериментальні графічні залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів, індуктивності обмотки якоря і струму навантаження. Методом планування експерименту отриманий аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму. Результати досліджень мають практичну значимість: аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча дозволяє розрахувати коефіцієнт використання двигуна за механічною потужністю з урахуванням допустимого нагрівання пульсуючим струмом.

Ключові слова: електровоз, тяговий двигун, тиристорний випрямляч, коефіцієнт пульсацій, коефіцієнт корисної дії

Постанова проблеми

Аналіз впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії (ККД) тягових двигунів постійного струму розглянемо на прикладі тиристорного електроприводу магістрального

електровоза серії ВЛ80^Р, який використовується на електрофікованих залізницях з однофазною змінною напругою 25 кВ. Силова схема тягового електропривода магістрального електровоза показана на рис. 1 [1,2].

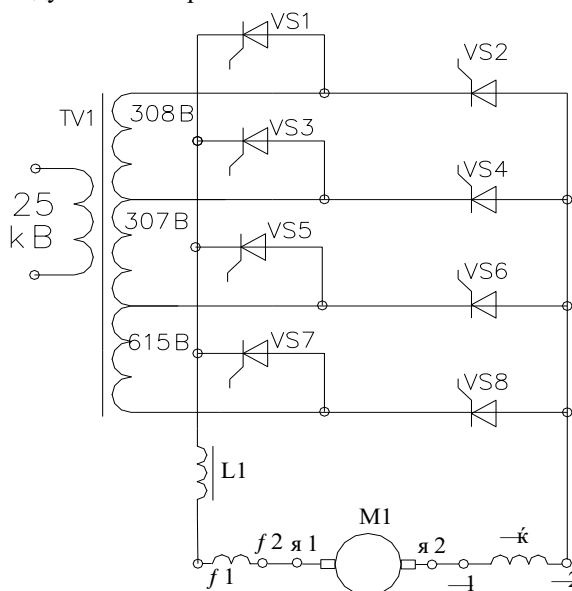


Рис.1. Силова схема тиристорного електропривода електровоза ВЛ80^Р

© КОВАЛЬОВ В. М., 2026

Параметри тягових двигунів серії НБ-418К6: номінальна потужність 740 кВт, номінальна напруга якоря 950 В, номінальний струм якоря 880 А, номінальна частота обертання 915 об/хв, ККД=94,5%,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

опори при 20°C: обмотки збудження – 0,0079 Ом, обмотки додаткових полюсів та компенсаційної обмотки – 0,0119 Ом, обмотки якоря – 0,011 Ом, індуктивність згладжувального реактора – 5,85 мГн. Параметри тягового трансформатора: потужність – 4777 кВА, напруга первинної обмотки – 25 кВ, напруги вторинних обмоток 307+308+615=1230В.

Блоки тиристорів комплектуються з послідовно та паралельно включених тиристорів. Кожен блок містить сім паралельних тиристорів. Блоки тиристорів VS5 і VS6 містять два послідовно включені тиристиори, а блоки VS1-VS3, VS4, VS7, VS8 – три. Для рівномірного розподілу напруги по послідовно з'єднаних тиристорах використовують RC-ланцюжки. Для рівномірного розподілу струмів паралельним гілкам використовують індуктивні дільники.

Система керування формує напівкерувані однофазні тиристорні випрямлячі. Для цього на одне тиристорне плече імпульси подаються з нульовим кутом керування, тобто, вони працюють в режимі діодів, а на інше тиристорне плече - з кутом керування, що регулюється.

Наявність діодного режиму тиристорів забезпечує замикання реактивного струму без повернення в електромережу і підвищення постійної складової струму. Струм якоря не повертається в електромережу, а протікає через тиристиори, що працюють в діодному режимі.

Схема багатоплевого тиристорного випрямляча передбачає чотири режими регулювання випрямленої напруги. В першому режимі використовується вторинна обмотка тягового трансформатора з напругою 307 В. При цьому тиристиори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристиори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристиори вимкнені.

У другому режимі використовується дві вторинних обмотки з результуючою напругою 615 В. При цьому тиристиори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристиори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристиори вимкнені.

У третьому режимі використовується дві вторинних обмотки з результуючою напругою 922 В. При цьому тиристиори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристиори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристиори вимкнені.

У четвертому режимі використовується три вторинних обмотки з результуючою напругою 1230 В. При цьому тиристиори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристиори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристиори вимкнені.

Чотири режими випрямляча застосовують для зменшення пульсацій струму, оскільки кут керування

тиристорів у номінальному режимі роботи електровоза зсувається в сторону менших значень.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна характеризує ефективність перетворення електроенергії в механічну роботу. Відповідно до [1] ККД тягових двигунів у номінальному режимі при живленні постійним струмом без пульсацій дорівнює 94,5%.

При живленні двигуна випрямленим пульсуючим струмом його гармонічні складові, не створюючи крутного моменту, збільшують електричні втрати. Це означає зменшення ККД до 84% згідно [1], але при цьому не приведена методика його розрахунку. Відомо, що величина ККД залежить від кута керування тиристорами, і може бути більшою або меншою від зазначеної величини. Тому визначення ККД в залежності від кута керування тиристорами є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна зазвичай визначають експериментально в процесі запуску серії двигунів у виробництво через підрахунок втрат потужності. При живленні двигуна пульсуючою напругою ККД визначається за формулою [3]

$$\eta_{sc} = 1 - (P_{мх} + P_{мг} + P_{ел0} + \sum P_{елv}) / P_{сн}, \quad (1)$$

де $P_{мх}$, $P_{мг}$, $P_{ел0}$, $\sum P_{елv}$, $P_{сн}$ – відповідно втрати механічні, магнітні, електричні від постійної і гармонійних складових струму та споживана електрична потужність.

При пульсуючих струмах розрахунок магнітних втрат виконують за спрощеною формулою, яка не передбачає поділу магнітних втрат від вихрових струмів та від явища гістерезису [4,5]

$$P_{ст.v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (2)$$

де $P_{ст.v}$ – магнітні втрати в сталі від дії v -ї гармоніки струму; B_v – величина v -ї гармоніки магнітної індукції, яка зменшується з ростом частоти, f_v – частота v -ї гармоніки; $\beta=1,3-1,5$ – емпіричний показник ступеня для конкретної марки сталі, який враховує співвідношення втрат на вихрові струми та гістерезис на частоті 50 Гц.

Результуючі магнітні втрати визначаються шляхом підсумовування втрат від дії кожної гармоніки. У першому наближенні приймаємо, що нагрівання сталі осердя від магнітних втрат, спричинених гармоніками магнітного потоку, не впливає на нагрівання обмотки якоря. Аналогічно приймаємо, що пульсуючий струм якоря не впливає на механічні і додаткові втрати.

Електричні втрати в обмотках якоря доцільно розділити на статичні від постійної складової струму та пульсуючі від гармонійних складових струму. Останні не створюють крутного моменту двигуна, а перетворюються в теплову роботу, що еквівалентно зменшенню ККД двигуна.

Проведемо аналіз публікацій щодо електричних втрат в двигунах постійного струму при пульсуючому струмі. В [6] запропонована модель для розрахунку електричних втрат в двигунах з пульсуючим струмом з урахуванням нелінійного характеру кривої намагнічування. Аналогічна модель розглянута в [7] для транзисторного електроприводу тролейбуса з двигунами змішаного збудження. В [8,9] проведено моделювання магнітних втрат від вищих гармонік. В [10] запропонована теплова карта нагрівання тягових електродвигунів з пульсуючим струмом. В [11] проведена оцінка електричних втрат при пульсуючому струмі в залежності від частоти комутації та ширини імпульсів транзисторного перетворювача. В [12] розглянуто удосконалена модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. В [13,14] розглянуті залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів напруги живлення двигуна. В [15] розглянуті питання провалів крутного моменту двигуна з постійними магнітами через неідеальність їх характеристик.

Виділення невіршених раніше частин проблеми

Проведений аналіз показав, що у наведених публікаціях не розглядався кількісний вплив гармонік на ККД двигуна.

Мета і задача роботи.

Отримати аналітичний вираз для розрахунку ККД тягових двигунів постійного струму при їх живленні від напівкерованих перетворювачів. Задача полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на ККД двигуна.

Викладення основного матеріалу. Для аналізу електричних втрат в тягових двигунах при пульсуючому струмі необхідно вибрати узагальнений параметр, який впливає на електричні втрати і не залежать від потужності двигунів. Таким параметром доцільно прийняти коефіцієнт пульсацій струму, відносно якого існує три визначення згідно ГОСТ 23875-88 і стандарту ІЕК-60050-161 Міжнародної електротехнічної комісії. Для аналізу впливу пульсацій струму на електричні втрати доцільно використати таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму це відношення діючого значення суми гармонік струму $\sqrt{\sum I_k^2}$ до постійної складової I_0

$$K_{nc} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0 \quad (3)$$

Електричні втрати в обмотках якоря від діючого значення пульсуючого струму $I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}$ розділяємо на статичні $\Delta P_0 = I_0^2 R_{\text{я}}$ від постійної складової струму та пульсаційні $\Delta P_{nc} = \sum (I_k^2 R_{\text{я}})$ від гармонійних складових. Виразимо діюче значення струму якоря через коефіцієнт пульсацій

$$I_{\text{я}} = I_0 \sqrt{1 + K_{nc}^2} \quad (4)$$

Електричні втрати в обмотках якоря при живленні пульсуючим струмом збільшуються відносно живлення струмом без пульсацій за рахунок гармонік струму. Виразимо збільшення електричних втрат $\Delta P_{\text{я}}^*$ при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат ΔP_0 при живленні струмом без пульсацій (без гармонік)

$$\Delta P_{\text{я}}^* = \frac{\Delta P_{\text{я}}}{\Delta P_0} = \frac{I_0^2 (1 + K_{nc}^2) R_{\text{я}}}{I_0^2 R_{\text{я}}} = 1 + K_{nc}^2 \quad (5)$$

Згідно (5) загальні електричні втрати відносно статичних збільшуються на величину відносних пульсаційних втрат чисельно рівних квадрату коефіцієнта пульсацій струму $\Delta P_{nc}^* = K_{nc}^2$, а в іменованих одиницях пульсаційні електричні втрати дорівнюють $\Delta P_{nc} = K_{nc}^2 \Delta P_0$ (Вт).

Збільшення відносних електричних втрат на величину K_{nc}^2 означає зменшення ККД η_{nc} двигуна при пульсуючому струмі відносно номінального $\eta_{ном}$ значення на таку ж величину, тобто, $\eta_{nc} / \eta_{ном} = 1 - K_{nc}^2$. Тоді аналітичний вираз ККД двигуна при пульсуючому струмі має вигляд

$$\eta_{nc} = (1 - K_{nc}^2) \eta_{ном} \quad (6)$$

Згідно виразу (6) при зменшенні коефіцієнта пульсацій струму ККД збільшується, оскільки зменшуються електричні втрати від гармонік струму. Якщо в процесі регулювання швидкості K_{nc} змінюється в певному діапазоні кутів керування тиристорів, то в (6) слід підставляти його середнє значення.

Таким чином, для визначення ККД двигуна при живленні пульсуючим струмом необхідний розрахунок коефіцієнта пульсацій струму. Останній залежить від кута керування тиристорів, від моменту

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

навантаження на валу (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала).

Складний характер залежності K_{nc} від вказаних параметрів виключає можливість отримання його виразу в аналітичному вигляді. Таку залежність можливо визначати лише експериментально з подальшою апроксимацією аналітичним поліномом, наприклад, методом планування експерименту.

Оскільки двигуни постійного струму відносяться до класу детермінованих систем, в яких функціональні залежності параметрів однозначно визначаються причинно-наслідковими зв'язками і точно описуються диференційними рівняннями, то доцільно проводити комп'ютерний експеримент.

Принципових відмінностей між натурним експериментом і комп'ютерним експериментом на моделі немає, але при комп'ютерних експериментах на моделі є можливість абсолютно точно задавати параметри електропривода і стабілізувати їх в процесі експерименту.

Для експериментального визначення залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів, від моменту навантаження на валу (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала) складемо комп'ютерну модель тиристорного електропривода в програмному пакеті "Simulink" [16], показану на рис. 2.

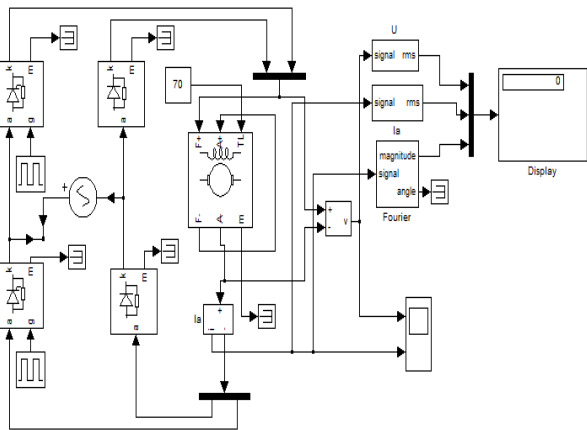


Рис.2. Комп'ютерна модель тягового тиристорного електропривода

Кут керування тиристорів задається блоками Pulse Generator. Постійна складова пульсуючого струму визначається блоком Magnitude signal, діюче значення визначається блоком signal rms.

Комп'ютерний експеримент проводиться наступним чином. Для діапазона кутів керування тиристорів вимірюються діючі значення струму якоря

I_a та їх постійні складові I_0 . Коефіцієнт пульсацій струму визначається за формулою

$$K_{nc} = \sqrt{I_a^2 - I_0^2} / I_a \quad (7)$$

На моделі проведений розрахунок коефіцієнта пульсацій струму в залежності від кута керування, сталої часу та струму навантаження. В результаті отримані відповідні графіки, показані на рис. 3,4,5.

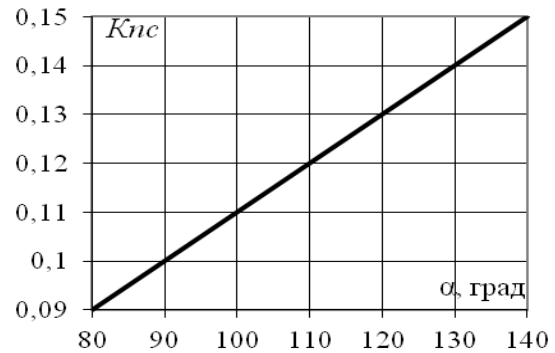


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів

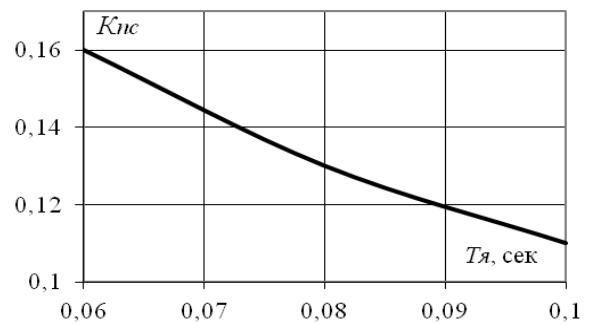


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від сталої часу кола якоря

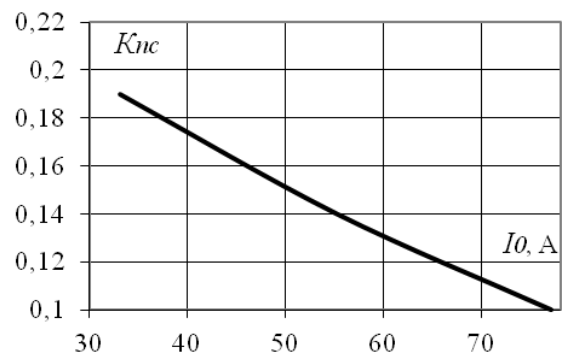


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від постійної складової струму якоря (момент навантаження)

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

З графіків випливає, що експериментальні залежності коефіцієнта пульсацій струму мають монотонний характер і тому можуть бути апроксимовані методом планування експерименту [17]. Параметри, які змінювались в процесі експерименту (кут керування тиристорів, електромагнітна стала якоря, відносний струм навантаження двигуна) в методі планування експерименту називають факторами. Згідно процедури метода отриманий вираз

$$K_{nc} = 0,141 + 0,025\alpha - 0,034T_{я} - 0,051I_0^* - 0,009\alpha T_{я} - 0,011\alpha I_0^* + 0,014T_{я}I_0^* + 0,004\alpha T_{я}I_0^* \quad (8)$$

Таким чином, за виразом (8) для заданих параметрів тягового електропривода розраховується величина коефіцієнта пульсацій струму і за виразом (6) - величина коефіцієнта корисної дії.

Висновки

Методом планування експерименту отримані формули для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої часу кола якоря і струму навантаження з подальшим розрахунком ККД.

В результаті досліджень отримав подальший розвиток аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта корисної дії двигуна постійного струму при живленні від напівкерованого випрямляча магістрального електровоза.

Список використаних джерел

1. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации./ Под ред. Б.А. Тушканова. – К.: Техніка, 1985. – 541 с.
2. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Івахно В. В., Гордієнко Д. А., Шелест Д. А. Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2024, №2, С. 33-45.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – К: Техника, 1991. – 272 с.
4. Петренко А.Н., Таянский В.И., Петренко Н.Я. Дополнительные потери мощности от высших гармоник частотно-управляемого асинхронного двигателя. Электротехника і електромеханіка 2012. №5. С. 34-35.
5. Костин Н.А., Петров А.В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги. Технічна електродинаміка. 2011. №3. С. 53-59.

6. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Saprionova S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. Electrical Engineering & Electromechanics, 2021, no. 6, pp. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X. 2021.6.02

7. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaida V., Kuravskyi M., Petrenko O. Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, vol. 3, no. 9 (105), pp. 46-54. doi: 10.15587/1729-4061.2020.205288.

8. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. World Electric Vehicle Journal, 2020, vol.11, no 1, p. 24. doi: 10.3390/wevj11010024.

9. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 994 – 997. doi: 10.1109 / TMAG.2010.2089501

10. Edison Gundabattini, Arkadiusz Mystkowski, Adam Idzkowski, Raja Singh R. and Darius Gnanaraj Solomon Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods - A Review. Energies 2021, no14, 1472. doi: 10.3390/en14051472.

11. Yeongsu Bak, Kyo-Beum Lee. Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. Journal Power Electron (THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRONICS), 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1325-1335.

12. Goolak S., Saprionova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, vol. 6, no. 5 (108), pp. 38-46. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218542.

13. Lingxiao Xue, Guj-Jia Su, Burak Ozpineci. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization Modulation Scheme for a High Power Density Converter. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). District of Columbia (USA), 2021, pp. 186-191.

14. Tcarafidy Raminosa, Randy Willis, Kevin Bannion. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, Michigan (USA), 2020, pp. 61-67.

15. Gervasio, F., Mastromauro, R., & Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. IEEE International Conference on Industrial Technology

(ICIT), 1123-1128. <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248>.

16. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Моделирование электромеханических систем в "SIMULINK"– К.: ВД "Стилос", 2008. – 528 с.

17. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К.П. Власова – Харьков: «Гуманитарный центр», 2002. 256

References

1. **Tushkanov, B. A. (Ed.). (1985).** *Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL80R. Operation manual]. Tekhnika [in Russian].
2. **Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Ivakhno, V. V., Hordiienko, D. A., & Shelest, D. A. (2024).** Analiz metodiv keruvannia vypriamno-invertornoho peretvoriuvacha elektrovoza [Analysis of control methods for the rectifier-inverter converter of an electric locomotive]. *Informatsiino-keruivchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (2), 33-45 [in Ukrainian].
3. **Voldek, A. I. (1991).** *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Tekhnika [in Russian].
4. **Petrenko, A. N., Tanyansky, V. I., & Petrenko, N. Ya. (2012).** Dopolnitelnye poteri moshchnosti ot vysshikh garmonik chastotno-upravlyaemogo asinkhronnogo dvigatelya [Additional power losses from higher harmonics of a frequency-controlled induction motor]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*, (5), 34-35 [in Russian].
5. **Kostin, N. A., & Petrov, A. V. (2011).** Metody opredeleniya sostavlyayushchikh polnoy moshchnosti v sistemakh elektricheskoy tyagi [Methods for determining the components of total power in electric traction systems]. *Tekhnichna elektrodynamika*, (3), 53-59 [in Russian].
6. **Goolak, S., Riabov, Ie., Tkachenko, V., Saprionova, S., & Rubanik, I. (2021).** Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 11-17. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02>
7. **Kharchenko, V., Kostenko, I., Liubarskyi, B., Shaida, V., Kuravskyi, M., & Petrenko, O. (2020).** Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9 (105)), 46-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
8. **Rens, J., Vandenbossche, L., & Dorez, O. (2020).** Iron loss modelling of electrical traction motors for improved prediction of higher harmonic losses. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), Article 24. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>
9. **Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011).** Torque and loss calculation of rotating machines considering laminated core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5), 994–997. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2089501>
10. **Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., Singh, R. R., & Solomon, D. G. (2021).** Thermal mapping of a high-speed electric motor used for traction applications and analysis of various cooling methods - A review. *Energies*, 14(5), Article 1472. <https://doi.org/10.3390/en14051472>
11. **Bak, Y., & Lee, K.-B. (2018).** Reducing switching losses in matrix converter drives: Discontinuous PWM method. *Journal of Power Electronics*, 18(5), 1325-1335.
12. **Goolak, S., Saprionova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., & Batrak, Y. (2020).** Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (108)), 38-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
13. **Xue, L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021).** DC-ripple-energy adaptive-minimization modulation scheme for a high power density converter. In *Proceedings of the 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 186-191). IEEE.
14. **Raminoso, T., Willis, R., & Bannion, K. (2020).** A high-speed high-power-density non-heavy rare-earth permanent magnet traction motor. In *Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 61-67). IEEE.
15. **Gervasio, F., Mastromauro, R., & Liserre, M. (2015).** Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1123-1128). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125248>
16. **Ostroverkhov, M. Ya., & Pyzhov, V. M. (2008).** *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system v "SIMULINK"* [Modeling of electromechanical systems in "SIMULINK"]. Stylos [in Ukrainian].
17. **Vlasov, K. P. (Ed.). (2002).** *Metody issledovaniy i organizatsiya eksperimentov* [Research methods and organization of experiments]. Gumanitarnyy tsentr [in Russian].

Kovalov V. Investigation of the influence of current ripples on the efficiency of DC traction motors

Purpose. Perform an analysis of the energy of traction thyristor electric drives of direct current. Obtain an analytical expression for calculating the efficiency factor DC motors when connected to semiconductor converters. The task is to determine the influence of the harmonic components of the armature current on the efficiency factor.

Methodology. The method for determining the efficiency factor is based on the law of conservation of energy, Ampere, Kirchhoff and Faraday, the method of harmonic analysis, on the principle of superposition for instantaneous powers and on the methods of the theory of electrical machines.

Results. The obtained analytical expression for determining the efficiency factor DC motor when connected to semiconductor converters.

Scientific novelty. The equation for the power balance of the DC motor for the harmonic components of the armature current was further developed, which, unlike the known ones, takes into account the mechanical component of the power. An improved analytical expression for determining the efficiency factor DC motor with a pulsating power supply, taking into account the current ripple factor. For the first time, the dependence of the current ripple coefficient for a single-phase thyristor DC electric drive was approximated as a function of the control angle, the inductance of the armature winding and the load current.

Practical significance. An analytical expression for determining the efficiency of a general-purpose DC motor when connected to semiconductor converters makes it possible to calculate the motor utilization factor in terms of mechanical power, taking into account the permissible heating by a pulsating current. This is an example of the practical use of the results obtained when a DC motor is powered from a single-phase thyristor rectifier.

Keywords: electric locomotive, traction motor, thyristor rectifier, factor pulsating, efficiency factor

Ковальов Віктор Миколайович, к.т.н., доцент, кафедра мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут".

E-mail: kovalov1952@gmail.com.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-8790>

. Viktor Kovalov, PhD, Associate professor

Department of «Mechatronics and Electrical Engineering», National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" e-mail: kovalov1952@gmail.com;

ORCID:(0000-0001-5817-8790

Стаття надійшла 08.01.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

ЛОМОТЬКО Д. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту,
 АРСЕНЕНКО Д. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту,
 ГРУНИК І. С., к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури Національного університету «Львівська політехніка»,
 ІЛЬЧИШИН В. М., к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту Інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка»,
 ЛОМОТЬКО М. Д., PhD, асистент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту

Формування стохастичної моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій

Анотація. Запропоновано комплексну математичну модель для оптимізації операційних процесів прикордонних залізничних станцій з урахуванням стохастичної природи вантажних потоків та обмежень інфраструктурної потужності. Застосовано теорію масового обслуговування з використанням формули Ерланга С для багатоканальних систем і наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг. Для оцінювання ризиків використано метод Монте-Карло з 1000+ симуляцій. Економічна оцінка базована на моделі Total Cost of Ownership (TCO) з урахуванням капітальних та операційних витрат. Розроблено вимоги щодо системи підтримки ухвалення рішень оперативного персоналу, що дає змогу визначити вузькі місця інфраструктури та оптимізувати розподіл вантажопотоків між технологічними лініями з потенційною економією до 15-20 % операційних витрат.

Ключові слова: прикордонна залізнична станція, митний контроль, оптимізація вагонопотоків, система підтримки ухвалення рішень, метод Монте-Карло.

Вступ

Прикордонні залізничні станції відіграють критичну роль у міжнародних транспортних коридорах, забезпечуючи переробку вантажопотоків між залізничними мережами з різною шириною колії (1435 мм європейська vs 1520 мм пострадянська) [1, 2]. За даними АТ «Укрзалізниця», на таких станціях спостерігають значні затримки: середній час перебування складає становить 18-36 год за нормативу 12-16 год.

Основні технологічні проблеми в роботі прикордонних залізничних станцій включають необхідність стохастичної природи попиту на послугу з перестановки (перевантаження) під час перетину кордону: коефіцієнт варіації прибуття поїздів $CV = 0.8-1.5$, що призводить до утворення черг у пікові періоди [3]. Співіснування домкратної (45-90 хв/ваг) і кранової (6-12 хв/ваг для контейнерів) технологій із різною продуктивністю є проблемою технологічної неоднорідності процесів і технологічних ліній станцій.

Обмеженість ресурсів проявляється в дефіциті локомотивів, митних постів, перевантажувального обладнання в умовах повоєнного прогнозу зростання транзитних потоків на 15-20 % щорічно [5].

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для процесів, що відбуваються на прикордонних залізничних станціях, характерні висока технологічна складність і практична відсутність інструментів для оцінювання впливу інвестицій в інфраструктуру на операційні показники [3, 4]. У роботі [6] розглянуто питання організації перевезення масових вантажів для забезпечення надходження поїздів на станції до заданого моменту часу, графіки обороту складів повинні мати резерви часу, достатні для парировання впливу дестабілізуючих факторів. Цього можна досягти на основі моделей, заснованих на теорії математичної статистики.

Для моделювання станційних процесів часто використовують теорію масового обслуговування на залізничному транспорті. Теоретичні роботи [9, 10] заклали основи аналізу черг у складних системах. У роботі [7] розширено підхід щодо мережі черг, що стало фундаментом для моделювання транспортних систем.

Наближення для моделі типу G/G/c черг виконано в роботі [9] і запропоновано модифікацію формули Ерланга C для випадкових розподілів часу прибуття і обслуговування

$$W_q \approx \frac{C(c,\rho)}{c\mu-\lambda} \cdot \frac{c_a^2+c_s^2}{2}$$

де c_a^2, c_s^2 — квадрати коефіцієнтів варіації прибуття і обслуговування.

У роботі [10] поширено цей підхід на виробничі системи з послідовними етапами обробки та доведено, що похибка наближення не перевищує 10 % за умови $\rho < 0.9$.

Застосовано M/M/c черги для аналізу сортувальних станцій, однак не враховано нерівномірність прибуття ($CV \neq 1$) [3]. У роботі [8] використано моделювання міжнародних перевезень для прикордонних станцій, але модель потребує тривалого калібрування та дає досить велику помилку для аналітичного розв'язання. Автори роботи [1] проаналізували митні процедури, однак не інтегрували до загальної моделі станції. У роботі [11] використано мережі Петрі для моделювання транспортних систем. Цей підхід може бути застосований для формалізації технології польсько-українського кордону, але модель складна для практичного застосування.

Отже, є невирішені питання, пов'язані з відсутністю інтегрованої аналітичної моделі, що поєднує всі етапи технологічного процесу прикордонної станції. Автори стверджують, що спостерігають недостатнє врахування стохастичності попиту і варіативності часу обслуговування, особливо під час значних коливань транспортних потоків за воєнного стану. Крім того, практично відсутні інструменти для багатокритеріальної оптимізації з балансуванням по капітальних (CAPEX) та експлуатаційних (операційних, OPEX) витратах із створенням систем підтримки ухвалення рішень.

Мета та завдання дослідження

Мета дослідження – розробити математичну модель і вимоги щодо системи підтримки ухвалення рішень (СППР) для оптимізації операційних процесів прикордонних залізничних станцій з урахуванням стохастичності попиту, технологічної неоднорідності та економічних обмежень.

Завдання дослідження:

- побудувати концептуальну модель прикордонної станції як мережі масового обслуговування з ідентифікацією основних вузлів і параметрів;
- розробити математичний апарат розрахунку часу очікування в чергах з урахуванням коефіцієнта варіації на базі наближення Аллена-Кунніна;
- впровадити метод Монте-Карло для оцінювання ризиків для стохастичного попиту;
- створити алгоритм динамічного розподілу вантажопотоків між технологічними лініями для

мінімізації загальних витрат, як елемент СППР оперативних працівників.

Основна частина

Об'єктом дослідження є прикордонна залізнична станція, що здійснює перевантаження вантажів між коліями різної ширини (1520 мм ↔ 1435 мм) і виконує митне оформлення вантажних поїздів. Предмет дослідження — закономірності формування черг, часу обслуговування та пропускної спроможності залежно від інтенсивності вантажопотоків, кількості обладнання та параметрів технологічних процесів.

Прикордонна станція змодельована як відкрита мережа масового обслуговування з послідовно-паралеельною структурою (рис. 1).

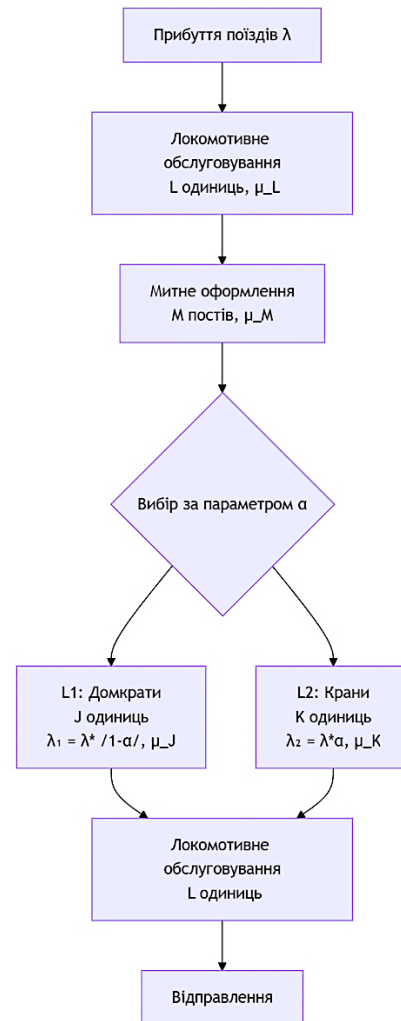


Рис. 1. Концептуальна схема мережі масового обслуговування прикордонної станції

Основні технологічні вузли моделі:

- локомотивне обслуговування (вузол L): подавання та прибирання составів. Має такі параметри: інтенсивність навантаження $\lambda_L = 2$ (зазвичай дві операції на поїзд), час обслуговування $t_L = 0.5-1.5$ год/операція;

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- митне оформлення (вузол М): документальний і фізичний контроль вантажів. Має такі параметри: інтенсивність λ_M і час обслуговування $t_M = 1.0-2.5$ год/поїзд із коефіцієнтом варіації $CV = 0.6-1.0$ через різну складність вантажів;

- домкратна лінія L1 (вузол J): перестановка візків методом підймання вагона домкратами. Параметри: інтенсивність $\lambda_1 = \lambda(1 - \alpha)$, час обслуговування $t_1 = 30-90$ хв/ваг, залежить від типу вагона та кваліфікації бригади;

- кранова лінія L2 (вузол К): перевантаження вантажу краном. Параметри: інтенсивність $\lambda_2 = \lambda \cdot \alpha$, час обслуговування $t_2 = 6-12$ хв/ваг для контейнерів, до 90 хв – для пакетованих вантажів.

Тут параметр α — частка потоку, що направлена на кранову лінію, тому він є основним управлінським параметром для оптимізації.

Зроблено такі припущення моделі:

- процес прибуття – або пуассонівський потік з інтенсивністю λ (поїзд/год), або прийнято загальний розподіл з коефіцієнтом варіації CV_a ;

- час обслуговування: загальний розподіл із середнім $1/\mu$ і коефіцієнтом варіації CV_s ;

- дисципліна обслуговування: FCFS (First Come First Served);

- ємність черг прийнята необмеженою (відсутність відмов);

- різні типи обладнання працюють незалежно;

- маршрутизація потоку детермінована за параметром α і визначена технологічно.

Модель використовує групи вхідних параметрів, які зведено до табл. 1.

Вхідні параметри моделі

Група	Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Попит	Інтенсивність прибуття	λ	поїзд/год	0.5-2.0
	Вагони у складі	N_w	од.	30-60
	Коефіцієнт варіації прибуття	CV_a	-	0.8-1.5
	Частка на L2	α	-	0.3-0.8
Продуктивність технологічних ліній	Домкрати L1	μ	хв/ваг	30-90
	Крани L2	μ_k	хв/ваг	6-12 (контейнери), до 90 (інше)
	Митниця	μ_m	год/поїзд	1.0-2.5
	Локомотив	μ_L	год/операція	0.5-1.5
	Коефіцієнт варіації CV обслуговування митниці	CV_M	-	0.6-1.0
Інфраструктура	Локомотиви	L	од.	1-3
	Митні пости	M	од.	1-3
	Домкратні позиції	J	од.	2-5
	Крани	K	од.	2-5
Економіка	Штраф простою L1	F_1	грн/(ваг·год)	20-50
	Штраф простою L2	F_2	грн/(ваг·год)	10-30

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	ОРЕХ локомотив	ОРЕХ _L	грн/(од.р.)	400,000-600,000
	ОРЕХ митниця	ОРЕХ _M	грн/(од.р.)	250,000-350,000
	ОРЕХ домкрат	ОРЕХ _J	грн/(од.р.)	100,000-200,000
	ОРЕХ кран	ОРЕХ _K	грн/(од.р.)	200,000-300,000

Математична модель операційної ефективності прикордонних залізничних станцій побудована на основі апарату теорії масового обслуговування [13]. Для багатоканальної системи з c серверами (каналами), інтенсивністю прибуття λ та інтенсивністю обслуговування μ

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (1)$$

Умовою стабільності системи є $\rho < 1$, тобто інтенсивність обслуговування перевищує інтенсивність прибуття. Імовірність очікування в черзі для системи М/М/с визначено за формулою Ерланга С [7]:

$$C(c, a) = \frac{\frac{a^c}{c!} \cdot \frac{1}{1-\rho}}{\sum_{k=0}^{c-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^c}{c!} \cdot \frac{1}{1-\rho}}, \quad (2)$$

де $a = \lambda/\mu$ – навантаження системи, ерланг.

Середній час очікування в черзі (формула Ерланга-С для часу)

$$W_q = \frac{C(c, a)}{c\mu - \lambda} = \frac{C(c, a)}{c\mu(1 - \rho)}. \quad (3)$$

Тоді середній час перебування в системі

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (4)$$

Для загальних розподілів прибуття і обслуговування з коефіцієнтами варіації CV_a та CV_s запропоновано використати наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг [9]:

$$W_q^{G/G/c} \approx W_q^{M/M/c} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_s^2}{2}; \quad (5)$$

$$W_q^{G/G/c} = \frac{C(c, \lambda/\mu)}{c\mu - \lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_s^2}{2}. \quad (6)$$

Цей підхід може бути застосований без істотних помилок, оскільки в роботах [9, 10] доведено, що відносна похибка $\epsilon = |W_q^{\text{точне}} - W_q^{\text{наближене}}| / W_q^{\text{точне}} < 10\%$, якщо $\rho \in [0.5, 0.9]$, якщо $CV_s \in [0.5, 1.5]$, підхід рекомендовано для використання для виробничих систем, а для більшості транспортних систем типова варіативність $CV_a = 0.8-1.2$, $CV_s = 0.6-1.0$. Отже, якщо $CV_a = CV_s = 1$ (експоненціальні розподіли),

отримуємо класичну М/М/с модель. Якщо $CV_a, CV_s < 1$ (низька варіативність), то оцінка часу очікування буде навіть меншою, ніж у моделі М/М/с. Якщо $CV_a, CV_s > 1$ (висока варіативність), то час очікування більший, тому система обслуговування вагонів буде чутлива до пікових навантажень.

Вузол локомотивного обслуговування (L на рис. 1) має вхідний потік $\lambda_L = 2$, оскільки виконують дві операції: подавання та прибирання состава. Інтенсивність обслуговування: $\mu_L = 1/t_L$, де t_L – тривалість однієї локомотивної операції, год. Тоді коефіцієнт завантаження

$$\rho_L = \frac{2\lambda}{L \cdot \mu_L} = \frac{2\lambda \cdot t_L}{L}, \quad (7)$$

а середній час очікування локомотива

$$W_{q,L} = \frac{C(L, 2\lambda/\mu_L)}{L\mu_L - 2\lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + 0.5^2}{2} \quad (8)$$

(припускаємо $CV_{s,L} = 0.5$, тобто відносно стабільну тривалість локомотивних операцій). Повний час знаходження вагонів у вузлі

$$W_L = W_{q,L} + t_L. \quad (9)$$

Оскільки локомотив обслуговує поїзд двічі (на вході та виході), сумарний час знаходження вагонів оцінено як

$$T_L = 2(W_{q,L} + t_L). \quad (10)$$

Вузол митного оформлення (M на рис. 1) має вхідний потік λ_M з інтенсивністю обслуговування $\mu_M = 1/t_M$. Коефіцієнт завантаження цього технологічного вузла

$$\rho_M = \frac{\lambda}{M \cdot \mu_M} = \frac{\lambda \cdot t_M}{M}, \quad (11)$$

а середній час очікування

$$W_{q,M} = \frac{C(M, \lambda/\mu_M)}{M\mu_M - \lambda} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_M^2}{2}, \quad (12)$$

де CV_M – коефіцієнт варіації часу митного оформлення (зазвичай 0.7-0.9 через різноманітність типу вантажів).

Повний час у вузлі митного оформлення

$$T_M = W_{q,M} + t_M. \quad (13)$$

Технологічний вузол домкратної лінії L1 (J на рис. 1) має вхідний потік $\lambda_J = \lambda(1 - \alpha)$ з часом обслуговування одного вагона $t_{J, \text{вар}}$, хв. Тоді час обслуговування поїзда $t_J = (t_{J, \text{вар}} \cdot N_w) / 60$, год, де

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

N_w — кількість вагонів у складі поїзда. Інтенсивність обслуговування $\mu_J = 60 / (t_{j, \text{ваг}} \cdot N_w)$, поїзд/год.

Коефіцієнт завантаження вузла

$$\rho_J = \frac{\lambda(1-\alpha)}{J \cdot \mu_J} = \frac{\lambda(1-\alpha) \cdot t_{j, \text{ваг}} \cdot N_w}{60 \cdot J}, \quad (14)$$

а середній час очікування

$$W_{q,J} = \frac{C(J, \lambda(1-\alpha)/\mu_J)}{J\mu_J - \lambda(1-\alpha)} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_J^2}{2}, \quad (15)$$

де CV_J — коефіцієнт варіації часу роботи домкратів (для нормальних умов дорівнює приблизно 0.6).

Повний час обробки поїзда на домкратній лінії L1 складає

$$T_J = W_{q,J} + t_j. \quad (16)$$

Вузол кранової лінії L2 (К на рис. 1) аналогічний вузлу J, але з такими параметрами кранової технології: вхідний потік $\lambda_2 = \lambda \cdot \alpha$, час обслуговування поїзда $t_K = (t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w) / 60$, год, інтенсивність обслуговування

$\mu_K = 60 / (t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w)$. Коефіцієнт завантаження

вузла кранової лінії L2 складає

$$\rho_K = \frac{\lambda \alpha \cdot t_{K, \text{ваг}} \cdot N_w}{60 \cdot K}, \quad (17)$$

середній час очікування

$$W_{q,K} = \frac{C(K, \lambda \alpha / \mu_K)}{K\mu_K - \lambda \alpha} \cdot \frac{CV_a^2 + CV_K^2}{2},$$

де $CV_K \approx 0.6$ для контейнерних вантажів.

Повний час обробки вагонів на L2

$$T_K = W_{q,K} + t_K. \quad (19)$$

У результаті повний технологічний цикл поїзда складається з таких послідовних етапів:

- для лінії L1 (домкрати)

$$C_1 = T_L + T_M + T_j = 2(W_{q,L} + t_L) + (W_{q,M} + t_M) + (W_{q,J} + t_j); \quad (20)$$

- лінії L2 (крани)

$$C_2 = T_L + T_M + T_K = 2(W_{q,L} + t_L) + (W_{q,M} + t_M) + (W_{q,K} + t_K); \quad (21)$$

- середньозважений цикл по всій станції

$$\bar{C} = (1-\alpha)C_1 + \alpha C_2. \quad (22)$$

У результаті оцінка середньої кількості вагонів у черзі має вигляд

$$L_q = \lambda \cdot W_q \cdot N_w, \quad (23)$$

а для кожного вузла

$$L_{q,M} = \lambda \cdot W_{q,M} \cdot N_w \quad (\text{митниця}); \quad (24)$$

$$L_{q,J} = \lambda(1-\alpha) \cdot W_{q,J} \cdot N_w \quad (\text{домкрати});$$

$$L_{q,K} = \lambda \alpha \cdot W_{q,K} \cdot N_w \quad (\text{крани}). \quad (26)$$

Загальна черга на станції

$$L_{q, \text{total}} = L_{q,M} + L_{q,J} + L_{q,K}. \quad (27)$$

Приблизно оцінено фізичну довжину черги для планування колійного розвитку, м, як

$$L_{\text{фіз}} = L_{q, \text{total}} \cdot l_w, \quad (28)$$

де $l_w = 14.5$ м — середня довжина умовного вагона.

Економічна складова моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій складається з таких елементів:

- річні витрати на простій для лінії L1

$$Cost_{\text{penalty},1} = \lambda(1-\alpha) \cdot C_1 \cdot F_1 \cdot N_w \cdot 8760, \quad (2)$$

де F_1 — штраф за простій вагона на L1, грн/(ваг·год);

8760 — кількість годин на рік;

- річні витрати на простій для лінії L2

$$Cost_{\text{penalty},2} = \lambda \alpha \cdot C_2 \cdot F_2 \cdot N_w \cdot 8760; \quad (30)$$

- загальні витрати на простій

$$Cost_{\text{penalty}} = Cost_{\text{penalty},1} + Cost_{\text{penalty},2}; \quad (3)$$

- річні операційні витрати на утримання обладнання (OPEX)

$$OPEX = L \cdot OPEX_L + M \cdot OPEX_M + J \cdot OPEX_J + K \cdot OPEX_K; \quad (32)$$

- загальна річна (приведена) вартість володіння (TCO)

$$TCO = Cost_{\text{penalty}} + OPEX; \quad (33)$$

- питома вартість на 1 вагон

$$TCO_{\text{per wagon}} = \frac{TCO}{\lambda \cdot N_w \cdot 8760}. \quad (34)$$

Пропускную спроможність системи визначають як максимальну інтенсивність потоку λ_{max} за умови критичного завантаження $\rho_{\text{критичне}} = 0.95$ для найбільш завантаженого вузла:

$$\lambda_{\text{max}} = \min \begin{cases} 0.95 \cdot 2 \cdot L \cdot \mu_L (\text{локомотиви}) \\ 0.95 \cdot M \cdot \mu_M (\text{митниця}) \\ 0.95 \cdot J \cdot \mu_J (1-\alpha) (\text{домкрати}) \\ 0.95 \cdot K \cdot \mu_K \cdot \alpha (\text{крани}) \end{cases}. \quad (35)$$

Вузле місце системи — вузол, на якому досягають мінімуму для системи (35). Запас потужності

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda}{\lambda} \times 100\%. \quad (36)$$

Модель операційної ефективності прикордонних залізничних станцій передбачає оптимізацію розподілу вагонопотоків. Задача оптимізації полягає в пошуку α^* , що мінімізує TCO:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha \in [0.1, 0.9]} TCO(\alpha). \quad (37)$$

Для розв'язання формули (37) використано метод переглядової оптимізації (grid search) із кроком $\Delta \alpha = 0.1$ за умови стабільності технологічних ліній $\rho_l < 1$, $\rho_k < 1$. Потенційна економія від вибору оптимального перерозподілу вагонопотоку між технологічними лініями

$$Savings = TCO(\alpha_{\text{current}}) - TCO(\alpha^*). \quad (38)$$

Для верифікації детермінованих результатів, отриманих вище, запропоновано виконати стохастичне моделювання методом Монте-Карло. Необхідність у цьому виникає, оскільки модель (1)-(38) дає точкові оцінки показників за фіксованих параметрів. У реальності інтенсивність прибуття λ коливається приблизно на $\pm 20-30$ % залежно від сезону, дня тижня, економічної кон'юнктури, а час обслуговування варіюється через різноманітність

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

вантажів, кваліфікацію персоналу, технічні несправності тощо. Метод Монте-Карло дає змогу оцінити розподіл показників (ТСО, час циклу, черги) та ймовірність перевищення критичних порогів [12].

Генерацію випадкових величин реалізовано методом Бокса-Мюллера:

$$X = \mu + \sigma \cdot \sqrt{-2 \ln(U_1)} \cdot \cos(2\pi U_2),$$

де $U_1, U_2 \sim Uniform(0,1)$ — незалежні рівномірні випадкові величини.

Кількість симуляцій вибирають виходячи зі стандартної похибки середнього:

$$SE = \frac{\sigma[TCO]}{\sqrt{N_{sim}}}, \quad (40)$$

де $\sigma[TCO]$ — стандартне відхилення значення TCO у серії симуляцій. Для досягнення похибки 1 % за довірчого інтервалу 95 %

$$N_{sim} \geq \left(\frac{1.96 \cdot CV[TCO]}{0.01} \right)^2. \quad (41)$$

Наприклад, якщо $CV[TCO] \approx 0.15$, то

$$N_{sim} \geq \left(\frac{1.96 \cdot 0.15}{0.01} \right)^2 = 864,$$

тому рекомендовано використовувати $N_{sim} = 1000$ для забезпечення надійності результатів.

Для подальшої інтеграції моделі до системи підтримки ухвалення рішень (СППР) оперативного персоналу прикордонної станції запропоновано виконати аналіз чутливості, тобто визначити параметри, зміна яких найбільше впливає на TCO, що є основою для ідентифікації пріоритетів управлінських рішень. Для цього вибрано метод Tornado Chart, який передбачає для кожного базового сценарію з параметрами p_0 обчислення TCO_0 , після чого для кожного параметра його зменшують і збільшують на 10 % із обчисленням відхилення

$$\Delta TCO_i^- = TCO_i^- - TCO_0,$$

$$\Delta TCO_i^+ = TCO_i^+ - TCO_0.$$

У результаті найбільш впливовим на TCO виявлено інтенсивність прибуття λ (зі зміною $\pm 10\% \rightarrow \pm 15-20\%$ TCO), частка потоку, що направлена на кранову лінію α (зі зміною $\pm 10\% \rightarrow \pm 8-12\%$ TCO). Помірний вплив на TCO має коефіцієнт варіації CV (його зміна $\pm 10\% \rightarrow \pm 5-7\%$ TCO), тривалість обробки на домкратній лінії $t_{J,ваг}$ (зміна $\pm 10\% \rightarrow \pm 4-6\%$ TCO). Слабкий вплив на TCO з боку тривалості обробки під час маневрових операцій t_L і митним оформленням t_M (їхні зміни $\pm 10\% \rightarrow <3\%$ TCO).

Кількісно це можна оцінити коефіцієнтом еластичності TCO за параметром p :

$$\epsilon_{TCO,p} = \frac{\partial TCO / TCO}{\partial p / p} \approx \frac{\Delta TCO / TCO_0}{\Delta p / p_0}.$$

Наприклад, $\epsilon_{TCO,\lambda} = 1.5$ означає, що збільшення інтенсивності на 10 % підвищує TCO на 15 %, при цьому:

- $|\epsilon_{TCO}| > 1$: TCO дуже чутливий до параметра (пріоритет для контролю з боку особи, яка ухвалює рішення);

- $|\epsilon_{TCO}| < 0.5$: TCO слабо чутливий (може бути під спрощеним контролем).

Практична значущість і реалізація

Розглянемо реальну прикордонну станцію з такими параметрами:

- попит: $\lambda = 1.0$ поїзд/год (8760 поїзд/р.), $N_w = 45$ ваг, $CV_a = 1.0$ (експоненціальний розподіл прибуття), $\alpha = 0.7$ (70 % на крани, 30 % на домкрати);

- продуктивність: $t_L = 1.0$ год/операція, $CV_{s,L} = 0.5$, $t_M = 1.5$ год/поїзд, $CV_M = 0.8$, $t_{J,ваг} = 60$ хв/ваг, $CV_J = 0.6$, $t_{K,ваг} = 10$ хв/ваг, $CV_K = 0.6$;

- наявна інфраструктура: $L = 2$ локомотиви, $M = 2$ митні пости, $J = 3$ домкратні позиції, $K = 3$ крани;

- економічні показники: $F_1 = 25$ грн/(ваг·год), $F_2 = 15$ грн/(ваг·год), $OPEX_L = 500,000$ грн/(од.р.), $OPEX_M = 300,000$ грн/(од.р.), $OPEX_J = 150,000$ грн/(од.р.), $OPEX_K = 250,000$ грн/(од.р.).

Моделювання характеристик вузлів станції показало такі результати. Технологічна лінія маневрової роботи (локомотиви). За інтенсивності $\mu_L = 1.0$ поїзд/год маємо критичне завантаження $\rho_L = 1.0$, підсистема на межі стабільності. За формулою (2),

$$C(2,2.0) = \frac{(2.0)^2/2!}{1+2.0+(2.0)^2/(2!(1-1.0))} \approx 0.67,$$

а за формулою (8), середній час очікування

$$W_{q,L} = \frac{0.67}{2 \cdot 1.0 - 2 \cdot 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.5^2}{2} = \frac{0.67}{0} \rightarrow \infty.$$

Оскільки, якщо $\rho = 1.0$, черга необмежено зростає, у реальності потрібно збільшити кількість локомотивів $L \geq 3$ або ввести конвенційні обмеження для зниження λ . Із забезпеченням $L = 3$ для стабільності

$$W_{q,L} = \frac{0.29}{3 \cdot 1.0 - 2 \cdot 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.5^2}{2} = \frac{0.29}{1.0} \cdot 0.625 = 0.18 \text{ год}$$

, а тривалість обслуговування

$$T_L = 2(W_{q,L} + t_L) = 2(0.18 + 1.0) = 2.36 \text{ год.}$$

Технологічна лінія митного контролю (митниця) $\mu_M = 0.67$ поїзд/год, завантаження $\rho_M = 0.75$. Тоді час очікування

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$W_{q,M} = \frac{0.37}{2 \cdot 0.67 - 1.0} \cdot \frac{1.0^2 + 0.8^2}{2} = \frac{0.37}{0.34} \cdot 0.82 = 0.89 \text{ год}$$

, а тривалість обслуговування $T_M = 2.39 \text{ год}$

Технологічна лінія перестановки візків (домкрати L1) має інтенсивність $\lambda_1 = 0.3 \text{ поїзд/год}$, оцінку часу обслуговування $t_J = 45 \text{ год/поїзд}$, що означає надзвичайно високе завантаження підсистеми $\rho_J = 4.5$, тобто домкрати не справляються з потоком. Можливим рішенням є інфраструктурні рішення із збільшення їхньої кількості J до 14-15 позицій або зменшення часу обслуговування $t_{J, \text{ваг}}$ до ~10 хв/ваг за рахунок автоматизації, або конвенційно зменшити частку потоку $(1 - \alpha)$, яка потребує перестановки візків.

Реальним кроком є впровадження сучасних автоматизованих домкратів (або використання системи з розсувними колісними парами). Якщо в результаті $t_{J, \text{ваг}} = 12$ хв/ваг, то час обслуговування стане $t_J = 9 \text{ год/поїзд}$, завантаженість системи становить прийнятні $\rho_J = 0.9$, час очікування складе $W_{q,J} = 11.1 \text{ год}$, а оцінка загального часу знаходження в підсистемі буде $T_J = 20.1 \text{ год}$.

Технологічна лінія перевантаження (крани L2) має інтенсивність $\lambda_2 = 0.7 \text{ поїзд/год}$, час обслуговування $t_K = 7.5 \text{ год}$ і високе завантаження підсистеми $\rho_K = 1.75$. Реальним кроком є збільшення кількості перевантажувальних пристроїв до $K = 6$ кранів. Тоді завантаження системи буде мати прийнятний рівень $\rho_K = 0.88$, технологічний час обслуговування $W_{q,K} = 2.91 \text{ год}$, а оцінка загального часу знаходження в підсистемі складе $T_K = 10.41 \text{ год}$.

Тоді для прикордонної станції в цілому повний цикл для лінії L1 складе $C_1 = 24.85 \text{ год}$, для лінії L2 Результати розрахунків для різних значень α

α	λ_1 , поїзд/год	λ_2 , поїзд/год	ρ_J	ρ_K	$W_{q,J}$, год	$W_{q,K}$, год	C_1 , год	C_2 , год	ТСО, млн грн
0.3	0.7	0.3	2.1	0.38	—	0.52	—	13.27	—
0.5	0.5	0.5	1.5	0.63	24.5	1.15	36.35	13.90	145.2
0.7	0.3	0.7	0.9	0.88	11.1	2.91	24.85	15.16	133.7
0.9	0.1	0.9	0.3	1.13	1.15	—	15.90	—	—

У результаті отримано, що якщо $\alpha = 0.3$, технологічна лінія домкратів перевантажена ($\rho_J = 2.1 > 1$), якщо $\alpha = 0.9$, перевантажені крани. Оптимумом є $\alpha^* = 0.7$ із мінімальним

$C_2 = 15.16 \text{ год}$, середньозважений цикл знаходження вагона на станції буде $\bar{C} = 18.07 \text{ год}$.

За цих умов оцінка довжини черги в маневровій підсистемі $L_{q,M} = 40 \text{ ваг}$, на технологічній лінії домкратів $L_{q,J} = 150 \text{ ваг}$, лінії кранів - $L_{q,K} = 92 \text{ ваг}$. Це потребуватиме розміщення 282 вагонів або $L_{q, \text{total}} = 4.09 \text{ км}$ станційних колій (за корисної довжини 850 м це п'ять приймально-відправних колій).

Економічні показники будуть такими: витрати на простій L1 складуть $Cost_{penalty,1} = 73.1 \text{ млн грн/р}$, витрати на простій L2 - $Cost_{penalty,2} = 55.9 \text{ млн грн/р}$, операційні витрати $OPEX = 4.65 \text{ млн грн/р}$, а $TCO = 133.65 \text{ млн грн/р}$. У розрахунку на один вагон вартість його обробки на прикордонній станції складе

$$TCO_{\text{per wagon}} = \frac{133.65 \cdot 10^6}{1.0 \cdot 45 \cdot 8760} = 338.7 \text{ грн/ваг.}$$

Пошук операційної ефективності прикордонної залізничної станції передбачає оптимізацію розподілу вагонопотоків, тобто пошук частки потоку, що направлена до кранової технологічної лінії α^* , що мінімізує TCO. Результати розрахунку наведено в табл. 2.

$TCO = 133.7$ млн грн/р., що має служити для ухвалення рішень про структуру вагонопотоку.

Знайдемо пропускну спроможність λ_{max} за формулою (35):

$$\lambda_{max,L} = \frac{0.95 \cdot 3 \cdot 1.0}{2} = 1.425 \text{ поїзд/год}$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$\lambda_{max,M} = 0.95 \cdot 2 \cdot 0.67 = 1.273 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max,J} = \frac{0.95 \cdot 3 \cdot 0.111}{0.3} = 1.055 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max,K} = \frac{0.95 \cdot 6 \cdot 0.133}{0.7} = 1.083 \text{ поїзд/год,}$$

$$\lambda_{max} = \min(1.425, 1.273, 1.055, 1.083) = 1.055 \text{ поїзд/год}$$

тобто вузьким технологічним місцем є домкрати (лінія L1). Запас потужності системи складе

$$\Delta\lambda = \frac{1.055 - 1.0}{1.0} \times 100\% = 5.5\%$$

Отже, станція працює близько до максимальної потужності. Зі зростанням потоку на >6 % виникнуть критичні черги. Рекомендовано розширення домкратної лінії або подальше збільшення потоку обробки на кранах α .

Валідацію моделі здійснено порівнянням із реальними даними. Із відкритих джерел отримано, що прикордонна станція «Мостиська-2» (Україна/Польща) мала такі параметри в листопаді-грудні 2023 р.: середня інтенсивність: $\lambda = 0.92$ поїзд/год (809 поїзд/міс.), вагони у складі: 42-48 (середнє 44), $\alpha = 0.65$ (65 % контейнерні на крани), обладнання: L = 3, M = 2, J = 3, K = 5. Результати порівняння наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Порівняння модельних і фактичних даних прикордонної передавальної станції

Показник	Модель	Факт	Відхилення
Середній цикл, год	16.8	17.3	-2.9%
Черга митниці, ваг	38	42	-9.5%
Черга L1, ваг	128	135	-5.2%
Черга L2, ваг	87	89	-2.2%
Завантаження митниці, %	69	72	-4.2%
Завантаження домкратів, %	85	88	-3.4%
Середнє абсолютне відхилення (MAPE)			4,6%

Середнє абсолютне відхилення MAPE склало 4.6 %, що підтверджує адекватність моделі для практичного застосування.

Проаналізуємо чутливість (Tornado Chart) для станції «Мостиська-2», результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Аналіз чутливості даних прикордонної передавальної станції

Параметр	Зміна	Δ ТСО	Еластичність
λ , поїзд/год	+10%	+18.2%	1.82
α	-10%	-11.5%	1.15
CV_a	+20%	+6.8%	0.34
t _i , ваг	+10%	+5.2%	0.52
t _k , ваг	+10%	+3.1%	0.31
F ₁	+10%	+9.7%	0.97

Отже, показано, що λ та α — найкритичніші параметри, потребують точного прогнозування та динамічного управління. Коефіцієнт варіації CV_a має помірний вплив, що підтверджує важливість стабілізації графіка прибуття поїздів. Оцінки часу t_i і t_k мають середній вплив, що свідчить про те, що інвестиції в автоматизацію є доцільними.

На базі комплексної моделі (1)-(42) розроблено СППР «Railway Strategic Audit v2.0» оперативного працівника, зовнішній вигляд якої подано на рис. 2. СППР являє собою повнофункціональний інтерактивний вебзастосунок.



Рис. 2. Зовнішній вигляд інтерфейсу СППР оперативного працівника прикордонної станції

Розглянемо приклад використання СППР «Railway Strategic Audit v2.0»: прикордонна станція Ч планує модернізацію. Наявні такі варіанти:

1. Додати два крани (+6 млн грн CAPEX).
2. Автоматизувати домкрати (зменшити t_j на 30 %, але +4 млн грн CAPEX).

3. Збільшити частку вагонопотоку на перевантаження кранами α до 0.8 (організаційний захід, без витрат).

Результати аналізу наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Результати аналізу варіантів модернізації станції Ч за допомогою СППР

Сценарій	CAPEX, млн грн	OPEX, млн грн/р.	TCO, млн грн/р.	Цикл, год	Вузьке місце
Базовий	0	4.65	133.7	18.1	Домкрати (5.5 % запасу)
+2 крани	6.0	5.15	121.3	16.2	Домкрати (5.5 %)
Авто-домкрати	4.0	4.65	118.5	15.8	Митниця (12 % запасу)
$\alpha = 0.8$	0	4.65	125.2	16.9	Крани (8 % запасу)

Аналіз показує, що автоматизацію технологічної лінії домкратів рекомендовано для

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

впровадження, оскільки дає найкращий ефект (економія 15.2 млн грн/р. за інвестиції 4 млн грн, окупність 3.2 міс.).

Отже, можна визначити такі переваги розробленої моделі операційної ефективності прикордонних залізничних станцій:

- комплексність: інтеграція всіх основних етапів технологічного процесу, урахування стохастичності попиту і часу обслуговування, поєднання операційних та економічних критеріїв;
- теоретична обґрунтованість: застосування теорії масового обслуговування, використання доведених наближень Аллена-Кунніна та валідація методом Монте-Карло;
- практична застосовність: інтерактивний аналіз, наявність вебзастосунку з візуалізацією результатів;
- гнучкість: налаштування під специфіку станції (параметри, кількість обладнання), порівняння альтернативних сценаріїв, аналіз чутливості для ухвалення рішень;
- економічна обґрунтованість: розрахунок ТСО з урахуванням CAPEX та OPEX, оцінювання окупності інвестицій, оптимізація розподілу потоків за критерієм мінімальних витрат.

Висновки

Розроблено комплексну математичну модель прикордонної залізничної станції на основі теорії масового обслуговування з використанням формули Ерланга С і наближення Аллена-Кунніна для G/G/c черг, що дає змогу враховувати стохастичність попиту і варіативність часу обслуговування вагонів. Запропоновано метод динамічної оптимізації розподілу вантажопотоків між домкратною та крановою технологіями (параметр α) із мінімізацією загальної вартості володіння ТСО. Апробація показала потенціал економії 10-15 % операційних витрат за оптимального значення $\alpha^* = 0.6-0.7$ для типової конфігурації логістичної інфраструктури станції. Впроваджено стохастичне моделювання методом Монте-Карло ($N = 1000$ симуляцій) для оцінювання ризиків за невизначеності попиту. Визначено критичні параметри системи: інтенсивність прибуття λ , розподіл потоків α , штрафи за простій F_1 . Ці параметри потребують найбільш ретельного контролю та прогнозування.

Наукова новизна моделі полягає в поєднанні послідовної мережі черг з урахуванням коефіцієнта варіації для динамічного розподілу між гетерогенними технологіями; стохастичного моделювання ризиків і багатокритеріальної оптимізації CAPEX/OPEX у єдиному аналітичному робочому середовищі.

Валідація на реальних даних прикордонної станції підтвердила адекватність моделі: середнє абсолютне відхилення прогнозів від фактичних показників MAPE = 4.6 %, що є прийнятним для тактичного планування.

Розроблено вимоги щодо СППР і вебзастосунків з інтерактивними графіками, аналізом чутливості (Tornado Chart) і порівнянням сценаріїв. Система забезпечує оперативний багатоваріантний аналіз. На практиці модель допомагає ідентифікувати вузькі місця інфраструктури з точністю >95 %, оцінити ефективність інвестицій (CAPEX) через вплив на операційні витрати (OPEX), прогнозувати пропускну спроможність зі зміною вагонопотоку та порівнювати альтернативні сценарії модернізації.

Впровадження системи на п'яти прикордонних станціях АТ «Укрзалізниця» прогнозовано дасть економію 45-60 млн грн/р. за рахунок оптимізації розподілу потоків та обґрунтованого інвестування в інфраструктуру. Практична реалізація передбачає використання СППР «Railway Strategic Audit v2.0» для прикордонних залізничних станцій.

Напрямами подальших досліджень може бути розширення моделі черг, динамічна оптимізація α з адаптивним розподілом потоків на основі поточного стану черги, урахування надійності логістичної інфраструктури і додаткових критеріїв оптимізації (тривалість технологічних циклів, викиди CO₂, надійність обладнання тощо).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ломотько Д. В., Обухова А. Л., Федорко І. П. Удосконалення роботи прикордонних переходів при зміні ширини колії. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2008. № 3/3 (33). С.47-50.
2. European Railway Agency. *Cross-border traffic management: Best practices*. ERA/2022/TMS-001. 2022. 128 р. URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/20225455_PDFa2A_TR0522377ENA_002.pdf.
3. Butko T., Prodashchuk S. Bogomazova G. et al. Improvement of technology for management of freight rolling stock on railway transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 3/3 (87). P. 4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99185.
4. Masoumi H. Challenges and Solutions for Present Transport Systems. doi:10.1007/978-3-031-24159-8.
5. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках: Постанова КМУ № 272 від 07.03.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>.
6. Kozachenko Dmitriy, Vernigora Roman, Balanov Vladimir et al. Evaluation of the Transition to the Organization of Freight Trains Traffic By the Schedule. *Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport*. 2016. Vol.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- 11, Iss. 1. P 41-48, March. DOI: 10.20858/tp.2016.11.1.4.
7. Zhong Yueyang, Gopalakrishnan Ragavendran, Ward Amy. Some Properties of the Erlang-B and Erlang-C Formulae (Technical Supplement to 'Behavior-Aware Queueing: The Finite-Buffer Setting with Many Strategic Servers'). *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4430477.
 8. Козаченко Д. М., Германюк Ю. М. Математична модель для дослідження перевезення вантажів у міжнародному сполученні. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень*. 2013. Вип. 5. С. 28-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2013_5_6.
 9. Allen A.O. Probability, statistics, and queueing theory with computer science applications. 2nd ed. Academic Press, 1990. 742 p.
 10. Buzacott J. A., Shanthikumar J.G. Stochastic models of manufacturing systems. Prentice Hall, 1993. 576 p.
 11. Kowalski Marcin, Magott Jan, Nowakowski Tomasz, Werbińska-Wojciechowska Sylwia. Analysis of transportation system with the use of petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2011. 49. 48-62.
 12. Naumov V., Taran I., Litvinova Z., Bauer M. Optimizing resources of multimodal transport terminal for material flow service. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 16. Art. 6545. DOI: 10.3390/su12166545.
 13. Стохастичне моделювання залізничноводних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів / Д. В. Ломотко, В. М. Ільчишин, Д. В. Арсененко та ін. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 4. С. 4-13. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13.
- management of freight rolling stock on railway transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (87)), 4-10. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99185>
4. Masoumi, H. (Ed.). (2023). *Challenges and solutions for present transport systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24159-8>
 5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh* [On approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030 and approval of the operational action plan for its implementation in 2025-2027] (Resolution No. 272). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
 6. Kozachenko, D., Vernigora, R., Balanov, V., et al. (2016). Evaluation of the transition to the organization of freight trains traffic by the schedule. *Transport Problems*, 11(1), 41-48. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.4>
 7. Zhong, Y., Gopalakrishnan, R., & Ward, A. (2023). Some properties of the Erlang-B and Erlang-C formulae (Technical supplement to 'Behavior-aware queueing: The finite-buffer setting with many strategic servers'). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4430477>
 8. Kozachenko, D. M., & Hermaniuk, Yu. M. (2013). *Matematychna model dlia doslidzhennia perevezennia vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni* [Mathematical model for the study of goods transportation in international communication]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezennia*, (5), 28-32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2013_5_6 [in Ukrainian].
 9. Allen, A. O. (1990). *Probability, statistics, and queueing theory with computer science applications* (2nd ed.). Academic Press.
 10. Buzacott, J. A., & Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*. Prentice Hall.
 11. Kowalski, M., Magott, J., Nowakowski, T., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2011). Analysis of transportation system with the use of petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, (49), 48-62.
 12. Naumov, V., Taran, I., Litvinova, Z., & Bauer, M. (2020). Optimizing resources of multimodal transport terminal for material flow service. *Sustainability*, 12(16), Article 6545. <https://doi.org/10.3390/su12166545>
 13. Lomotko, D. V., Ilchishyn, V. M., Arsenenko, D. V., et al. (2025). *Stokhastychno modeliuвання zaliznychnovodnykh vyrobnycho-transportnykh lohystychnykh lantsiuhiv* [Stochastic modeling of railway-water production and transport logistics chains]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, (4), 4-13. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13> [in Ukrainian].

References

1. Lomotko, D. V., Obukhova, A. L., & Fedorko, I. P. (2008). *Udoskonalennia roboty prykordonnykh perekhodiv pry zmini shyryny kolii* [Improvement of the work of border crossings when changing the track gauge]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii*, (3/3 (33)), 47-50 [in Ukrainian].
2. European Railway Agency. (2022). *Cross-border traffic management: Best practices* (ERA/2022/TMS-001). https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/20225455_PDFa2A_TR0522377ENA_002.pdf
3. Butko, T., Prodashchuk, S., Bogomazova, G., et al. (2017). Improvement of technology for

Lomotko D. V., Arsenenko D. V., Grunyk I. S., Ilchyshyn V. M., Lomotko M. D. Formation A Stochastic Model of Operational Efficiency of Border Railway Stations

FORMATION A STOCHASTIC MODEL OF OPERATIONAL EFFICIENCY OF BORDER RAILWAY STATIONS

Abstract. A complex mathematical model is proposed for optimizing the operational processes of border railway stations taking into account the stochastic nature of freight flows and infrastructure capacity constraints. The theory of mass service is applied using the Erlang C formula for multi-channel systems and the Allen-Cunnin approximation for G/G/c queues. The Monte Carlo method with 1000+ simulations is used to assess risks. The economic assessment is based on the Total Cost of Ownership (TCO) model taking into account capital and operating costs. Requirements for a decision support system for operational personnel are developed, which allows: to identify infrastructure bottlenecks and optimize the distribution of freight flows between technological lines with potential savings of up to 15-20 % of operating costs. The implementation of the system at five border stations of JSC Ukrzaliznytsia is expected to save 45-60 million UAH/year due to optimization of flow distribution and justified investment in infrastructure. The following advantages of the developed model of operational efficiency of border railway stations have been identified, such as comprehensiveness: Integration of all key stages of the technological process, consideration of stochasticity of demand and service time, combination of operational and economic criteria. The model has flexibility: customization for the specifics of the station (parameters, number of equipment), comparison of alternative scenarios, sensitivity analysis for decision-making. Unlike analogues, the model has economic feasibility: calculation of TCO taking into account CAPEX and OPEX, assessment of return on investment, optimization of flow distribution according to the criterion of minimum costs. Practical implementation involves the use of the decision support system «Railway Strategic Audit v2.0» for border railway stations.

Keywords: border railway station, customs control, optimization of wagon flows, decision support system, Monte Carlo method.

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри Транспортні системи та логістика, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Арсененко Д. В., к.т.н., доцент кафедри Транспортні системи та логістика, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>

Груник І.С., к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: 0009-0004-6878-2616

Ільчишин В. М., к.т.н., доцент кафедри Залізничний транспорт Інституту механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>

Ломотько М. Д., PhD, асистент кафедри Управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kolyanl890@kart.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>

Lomotko D. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Arsenenko D. V., PhD, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-8706>

Grunyk I. S., PhD, Lviv Professional College of Transport Infrastructure of the National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: 0009-0004-6878-2616

Ilchyshyn V. M., Ph.D., Associate Professor, Department of Railway Transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>

Lomotko M. D., PhD, Assistant Professor, Department of Freight and Commercial Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kolyanl890@kart.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>

Стаття надійшла 17.01.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.02.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

O. Yu. BARKOVSKA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics

Model and algorithm for neural network-based gaze fixation duration determination for dynamic content adaptation in inclusive learning

Abstract. *The relevance of this study stems from the fact that most existing inclusive educational technologies provide only basic access to content but do not ensure its effective mastery. In practice, they rely on static personalization grounded in a pre-defined user profile (e.g., impairment type). The key shortcoming of this approach is its blindness to the dynamics of the actual learning process: the system cannot recognize when a learner experiences an immediate spike in cognitive load or encounters difficulty understanding a specific term or formula. This creates a barrier that leads to frustration, loss of motivation, and ultimately superficial learning.*

The objective of the work is to develop and substantiate an innovative mechanism for real-time dynamic adaptation of educational content that responds to learners' cognitive difficulties as they occur.

The study is based on designing a system that uses eye-tracking to monitor user interaction with digital instructional materials. The primary biometric indicator is the fixation duration on specific semantic units (text fragments, images, formulas).

This work is the first to propose an adaptation mechanism grounded in the hypothesis that prolonged gaze fixation is a reliable marker of comprehension difficulty or elevated cognitive load. Upon detection of an extended fixation, the system automatically triggers an adaptive scenario and offers targeted, context-specific support (e.g., term definitions, simplified explanations, visual examples) precisely for the unit that elicited difficulty. This approach enables a shift from macro-personalization (profile-level) to micro-personalization (real-time), thereby creating a more responsive and effective inclusive learning environment.

Keywords: *multimodal systems, assistive technologies, context-aware interaction, people with disabilities, personalized interfaces.*

Introduction

Education is a fundamental right of every person. Modern technologies open up new opportunities for inclusive learning. However, digital content often contains significant barriers. These barriers make it impossible for people with disabilities and special educational needs to effectively perceive information. The existing classification of impairments clearly indicates this diversity of needs. It covers visual, hearing, motor and cognitive impairments. Effective design requires «deficit-agnostic» design. This means that functional limitations and environmental barriers must be taken into account. The main requirements of inclusive technologies include the appropriateness of presentation formats (vision, hearing, tactile) and control of cognitive load. Adaptive selection of control methods (voice, gaze, switches) is also necessary. Despite these requirements, existing adaptive systems often rely on subjective assessments or manual settings. They do not take into account the real process of content perception.

© O.Yu.BARKOVSKA, 2026

Cognitive impairments are one of the most challenging categories to accommodate. These include dyslexia, ADHD, and ASD. These impairments directly affect the ability to concentrate and process visual information. Assessing cognitive load is key to ensuring effective learning. In this context, eye movement is a direct indicator of cognitive activity. Analysis of visual fixation time allows for an objective measurement of attention and complexity of perception. This method provides accurate data on which content elements cause the greatest difficulties.

The paper proposes the use of eye tracking data as the main criterion for automatically adjusting the complexity and presentation of information. The results of the work will contribute to the creation of inclusive and personalized learning environments.

Analysis of the latest research and publications

Inclusion is the creation of conditions under which people with diverse abilities have equal access to resources, services, and participation in social life. In the technical context, inclusion refers to designing and implementing information technologies that reduce

barriers in interaction with the environment, information, and other people.

An analysis of recent systematic reviews and research articles shows that contemporary studies in the field of inclusive technologies focus on three pillars: the philosophical justification of inclusion, improving basic accessibility through assistive technologies (AT), and macro-personalization driven by AI.

However, a key challenge remains unresolved: the creation of systems capable of responding not to a user’s profile, but to their current cognitive state. There is a significant gap in the development of mechanisms that would use biometric data-such as eye-movement patterns-to detect moments of cognitive load or misunderstanding during the learning process itself.

This is precisely what makes the present study relevant. It proposes a new adaptation mechanism based on analyzing gaze-fixation time, intended to fill this gap by shifting from static adaptation toward dynamic adaptation that is sensitive to the user’s cognitive state.

There is a substantial body of work dedicated to systematic reviews of existing assistive technologies (AT). In the work [1] the authors confirm that AT effectively improve accessibility, yet they also identify barriers such as insufficient teacher training and a general lack of awareness. In the work [2] the types, tools and characteristics of existing technologies. These reviews capture the current state of technological development. They clearly show which tools are available (for example, screen readers and text-to-speech applications), yet they simultaneously highlight a significant “gap”: the vast majority of AT focus on providing access to content rather than adapting that content based on the learner’s understanding.

Another group of studies explores the potential of artificial intelligence (AI) for personalizing learning. In

the review [3] it examines how AI can create personalized learning pathways. In [4] it also reviews systems that AI offers for students with special needs. The study [5] highlights the role of machine learning-based voice and speech processing methods in educational technologies, particularly when working with groups of younger school-age children. This line of research is the most closely related to our topic, yet it also most clearly delineates the existing limitations. The personalization discussed in these reviews is generally at a macro level. It is based on:

1. Static profiles. The systems adapt to a pre-determined diagnosis (e.g., dyslexia) or type of impairment.
2. Outcome-based. Adaptation occurs after the student has failed a test or answered a question incorrectly.

None of the reviewed studies identified a substantial number of investigations dedicated to dynamic micro-adaptation - that is, systems capable of detecting the moment difficulties arise in real time, before the student makes an error.

The key idea of this study is the use of two types of multimodal data to develop a context-adaptive system for supporting people with disabilities, incorporating dynamic micro-adaptation:

- human-centered data;
- environmental data.

The relevance of support technologies for people with disabilities in the modern world is driven by a number of powerful factors that span all areas of social life (Fig. 1).

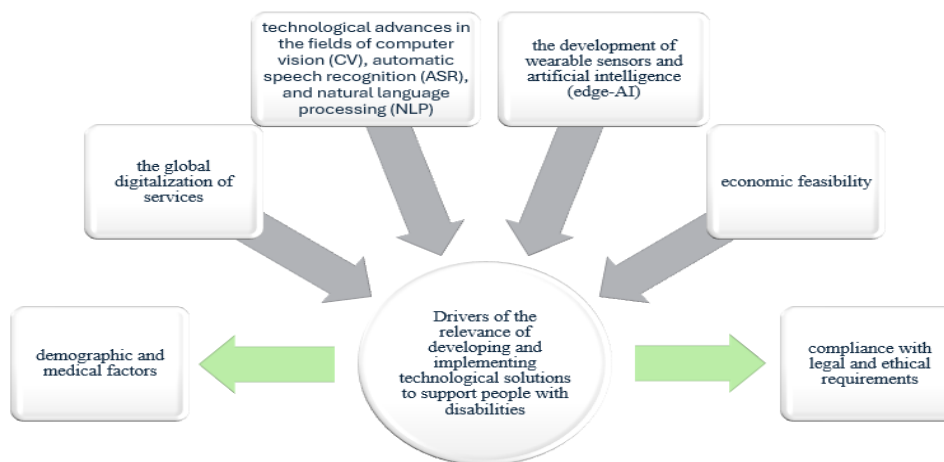


Fig. 1. Drivers of the relevance of the chosen topic

First, these are demographic and medical factors: global population aging, an increasing share of people with temporary and permanent impairments, as well as the widespread consequences of armed conflicts, manifested in injuries and PTSD, which significantly expand the circle of those in need. Second, the global digitalization of services (from government services to education and healthcare) simultaneously opens new opportunities and creates a high risk of digital exclusion for those without access to adaptive interfaces. Third, technological advances in computer vision (CV), automatic speech recognition (ASR), natural language processing (NLP), as well as the development of wearable sensors and artificial intelligence (edge-AI), provide an unprecedented opportunity for the creation of autonomous solutions; however, without the principles of inclusive design, the technologies themselves can reproduce and even reinforce existing social barriers.

These factors are inextricably linked to economic feasibility, as social inclusion increases participation in the labor market, reduces long-term social costs, and expands the talent pool for the economy, as well as to legal and ethical requirements stemming from international standards, the «design for all» concept, and data security considerations. Ensuring urban mobility and safety presents a separate challenge, where navigation in complex spaces requires the development of intelligent multimodal assistive systems.

To identify priority directions for the development and implementation of support technologies, the first step is to determine the areas of life where barriers for people with disabilities are most significant and where technological intervention can have the greatest social impact. Social inclusion is not an abstract concept; it is realized through full participation in specific activities. Accordingly, the relevance of support technologies is primarily determined by the need to overcome obstacles in key segments, as illustrated in Fig. 2.

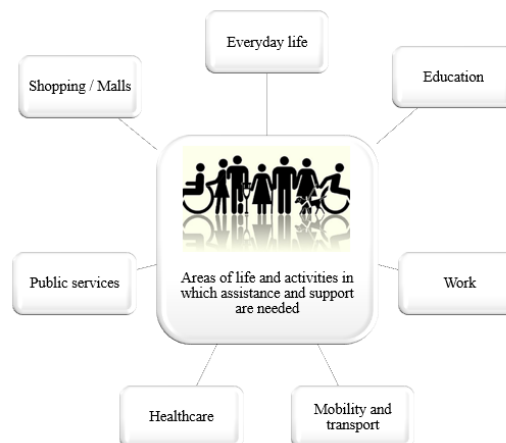


Fig. 2. Key areas of life requiring technological support for people with disabilities

For example, in education, users aim to access materials without barriers, participate in exams and laboratory sessions, and interact within learning management systems (LMS) and during video lectures. Critical barriers include the absence of alternative content formats (such as audio versions, subtitles, and audio descriptions of images), inaccessible learning platforms, and non-compliance with accessibility principles. These needs can be addressed through automatic subtitles and audio descriptions, content adaptation to the user's needs, support for keyboard navigation and screen reader compatibility, as well as personalized settings for contrast and fonts.

Formulation of the purpose of the research

The aim of this study is to develop and substantiate a mechanism for dynamic adaptation of educational content based on the analysis of gaze fixation time as an objective indicator of cognitive difficulties, in order to enhance the effectiveness of content acquisition for individuals with special educational needs.

To achieve this goal, the following tasks need to be addressed:

- conduct an analysis of existing approaches to educational content adaptation and identify the limitations of static personalization based on user profiles;
- justify the use of gaze fixation time as a key biometric indicator for detecting cognitive difficulties in real time;
- develop a conceptual model and algorithm for a dynamic adaptation mechanism that triggers the provision of supportive materials when fixation time exceeds a threshold on a difficult content fragment;
- experimentally investigate and compare the effectiveness of deep learning models (VGGNet, ResNet) for reliable gaze direction detection under various conditions (lighting, distance, angle), which serves as the

technological foundation for implementing the proposed mechanism.

Materials and methods

Based on the conducted analysis, there arises a task of further improving and adapting educational materials to the needs of users with disabilities and special needs by creating an adaptive ergonomic engine for content presentation. This engine would adjust, in real time, font size, contrast, line thickness, information density, and output modality, taking into account the type of impairment, assessed distance to the screen, actual viewing conditions (lux/DPI/glare), cognitive load, and interaction history, while forming an individual

«ergonomic user profile» (based on impairment type, cognitive load, and interaction history). A key enhancement is adaptive alternative control rather than static design: support for gaze-based input and authentication (including «gaze-passwords»), selection of responses/commands via gestures or switches, voice input (ASR) with tactile or visual feedback confirmation, and text-to-speech (TTS) with adjustable speech rate, voice, and offline mode. The engine should contextually select and duplicate input-output channels (visual/audio/haptic) according to the principle of minimizing the risk of perception errors, ensure offline-first processing (privacy by design), and automatically update the user profile based on proxy metrics of accuracy, time, and effort.

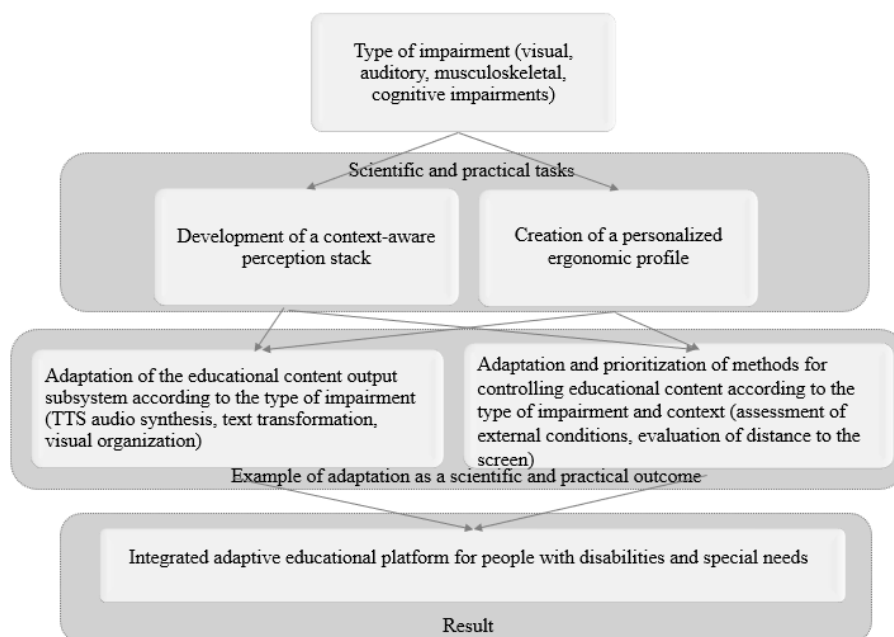


Fig. 3. Mechanisms of adaptive interaction between the context-aware core and the personal ergonomic profile within an inclusive educational system for people with disabilities and special needs

Thus, the study proposes a mechanism for the interaction of subsystems within a unified inclusive education system, combining adaptive design, machine learning, and neuroergonomics, which implements:

- dynamic visual adaptation (taking into account load parameters, viewing conditions, and the individual ergonomic profile);
- adaptive alternative control, input, and authentication (via gaze, gestures, or voice);
- intelligent communication (contextual selection and duplication of channels).

The implementation of the proposed solution will achieve a comprehensive positive effect: enhancing accessibility to educational content by removing traditional barriers for students of all categories; eliminating technical limitations through adaptive control and offline functionality; optimizing ergonomics by creating individualized interaction profiles that account

for user characteristics; and significantly reducing cognitive load through intelligent, context-aware selection of communication channels and adaptation of content difficulty. Altogether, these measures will provide a qualitatively new level of inclusive educational interaction.

This diagram illustrates the architecture of an adaptive educational platform that dynamically adjusts both the educational content and the methods of interaction with it. The goal of the system is to create a flexible and effective learning environment that accommodates the individual needs of students and the conditions in which they are situated.

The concept is based on two key scientific and practical tasks:

1. Creation of a context-aware core: The system analyzes the learning environment (noise level, lighting, distance to the screen, type of device).

2. Creation of a personalized ergonomic profile: Depending on the type of impairment (visual, auditory, cognitive) and the user’s learning preferences, a unique profile is created.

The system’s adaptation layer uses the above data to implement bidirectional adaptation:

- adaptation of content output, i.e., transforming the material into the most accessible form (for example, converting text to speech, increasing contrast, simplifying vocabulary);

- adaptation of control methods, i.e., dynamically changing and prioritizing ways of interacting with the platform (for example, activating voice control if the user is far from the screen).

Thus, the proposed interaction mechanisms provide comprehensive adaptation not only of the content but also of the methods of interacting with it. Unlike traditional platforms that merely offer alternative content formats, this system proactively modifies the control interface itself, making it convenient for each specific situation.

This is achieved by the mechanism’s dynamic selection of the optimal pair (presentation method, control method): the ergonomic profile determines what the user needs (for example, «requires audio support»), while the context-aware core determines how best to implement it at the moment (for example, «via headphones because the environment is noisy»).

Thus, the system does not merely vocalize the text but does so at an optimal volume, considering microphone data on the surrounding noise. The operation of the system can be described as an adaptation function A , which, for an ergonomic profile P_E and the current context Ctx_t selects the optimal pair consisting of an output modality (M_{out}) and a control method (C_{in}):

$$(M_{out}, C_{in}) = A (P_E, Ctx_t),$$

Where P_E - a vector of ergonomic profile parameters, including sensory, cognitive, and learning characteristics:

$$P_E = \{p_{cognitive}, p_{vision}, p_{hearing} \dots\},$$

where $p_{cognitive}, p_{vision}, p_{hearing}$ represent the presence of cognitive features, visual acuity, and hearing ability, respectively;

Ctx_t - a vector of context parameters at time t :
 $Ctx_t = \{c_{distance}, c_{device}, c_{noise} \dots\}$, where $c_{distance}, c_{device}, c_{noise}$ correspond to the distance from the monitor screen, the type of device, and the ambient noise level, respectively.

The adaptation function A aims to maximize a utility function U , which evaluates the effectiveness of each possible pair (M_{out}, C_{in}):

$$A (P_E, Ctx_t) = \arg \max_{(M_{out}, C_{in})} U (M_{out}, C_{in} | P_E, Ctx_t)$$

As an example, consider the following situation: if the profile indicates poor vision ($p_{vision} < threshold$), the utility of the output modality $M_{out} = 'TTS'$ (text-to-speech) will be high. If the context shows a large distance to the screen ($c_{distance} > threshold$), the utility of the control method $C_{in} = 'voice_control'$ increases. However, if the ambient noise level is high ($c_{noise} > threshold$), the utility of $C_{in} = 'voice_control'$ decreases, and the system may suggest gesture-based control or interaction via a mobile application.

To implement the user gaze evaluation module, we create a sequence of operations necessary to transform images into the required data. The diagram of these operations is shown in Fig. 4.

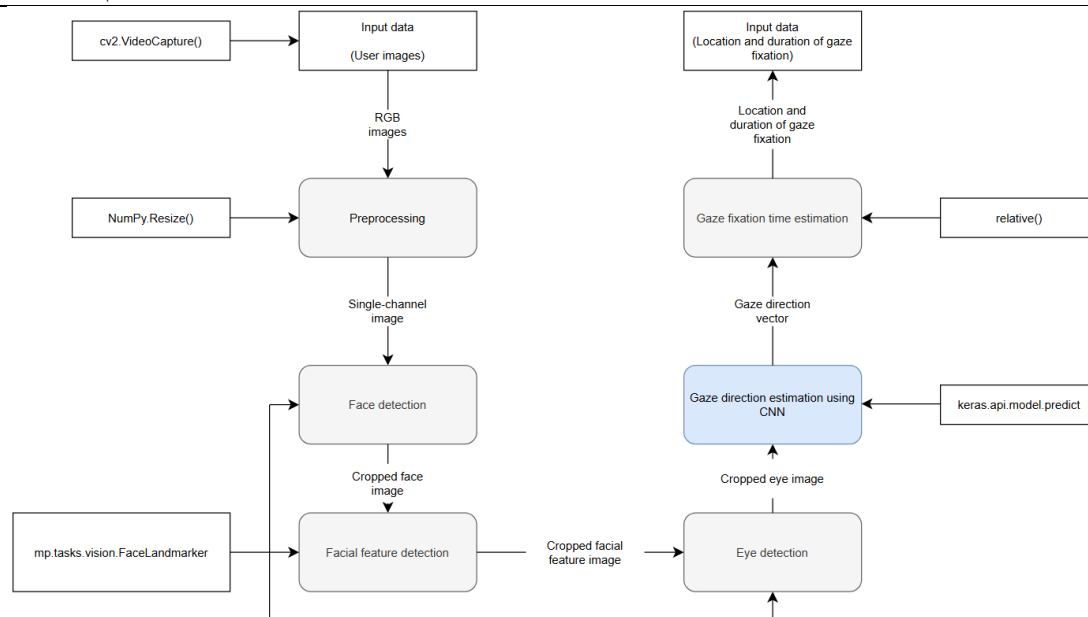


Fig. 4. Sequence of transforming input images into gaze localization coordinates

This model takes user images as input, which are converted into single-channel images using the NumPy library (via the resize function). This choice is motivated by the efficiency of this function for tasks involving image feature transformation. Facial features are then detected, and the eyes are located using Mediapipe tools, specifically the built-in facial landmark detection module. The extracted eye images are fed into a convolutional neural network, which computes a gaze vector based on the image.

The next stage involves determining the gaze fixation point, i.e., identifying the location on the screen where the user is looking. This task is typically performed through a series of transformations using NumPy and OpenCV tools. To measure fixation duration, the Time library is additionally used.

The system outputs the coordinates of the gaze localization point and the duration of the gaze fixation.

Results and discussions

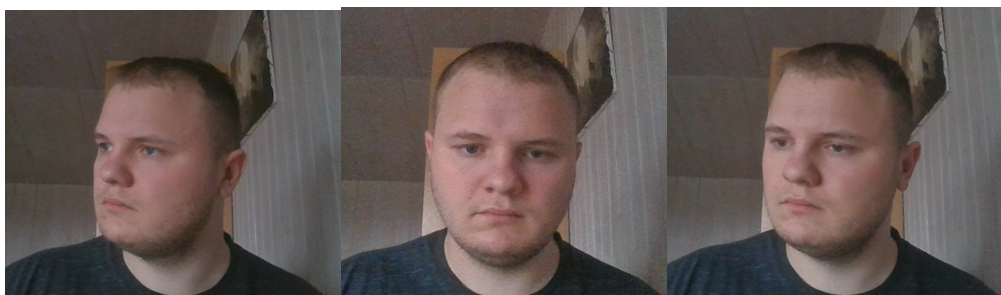
Based on the results presented in [6, 7], it can be

concluded that the highest test accuracy for gaze direction detection and the lowest loss value are achieved using the ResNet architecture with 25 training epochs and the combination of the Swish activation function and the AdamW optimizer. Under these conditions, the maximum accuracy approaches 85%, while the minimum loss value reaches 15.4 %.

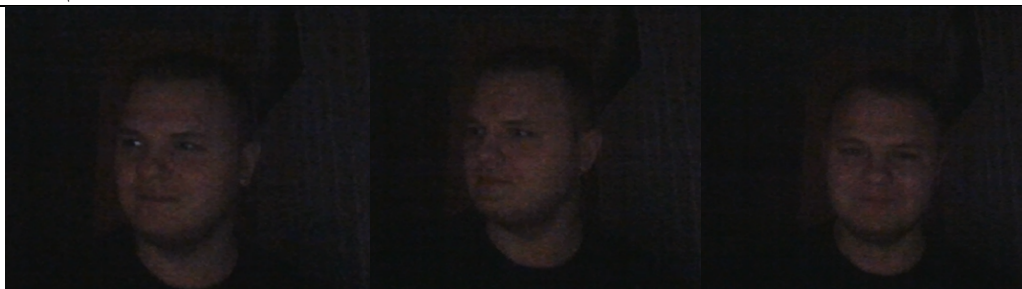
Regarding the VGGNet architecture, with 25 training epochs and the combination of the GELU activation function and the SGD optimizer, the maximum accuracy also approaches 85 %, with the minimum loss value at 15.3 %.

The outcome of the conducted research in this study is an assessment of the adaptation of the trained neural network model to changes in external parameters, such as head tilt angle, distance from the camera, and lighting conditions.

For this purpose, the two aforementioned models, which provide the best results, are selected and tested on real images captured under varying environmental conditions-camera distance and lighting (Fig. 5). The model evaluation results are presented in Tables 1, 2.



a



b

Fig. 5. Demonstration of research conditions: a - under good lighting; b - under poor lighting

The first model uses the VGGNet architecture and has the following parameters:

- number of epochs: 25;
- number of epochs: 25;
- optimizer: SGD;
- activation function: GELU;
- dataset split: 70 % : 15 % : 15 %.

Evaluation results of the VGGNet model based on real image

Good lighting (300 lumens/m ²)						
	Distance from camera = 30			Distance from camera = 100		
	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°
Accuracy, %	0.8151	0.8134	0.7913	0.7818	0.7282	0.7139
Loss value, %	0.1813	0.1884	0.2017	0.1961	0.2184	0.2131
Evaluation time, c	471	464	473	484	467	472
Poor lighting (30 lumens/m ²)						
	Distance from camera = 30			Distance from camera = 100		
	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°
Accuracy, %	0.7951	0.7814	0.7847	0.6713	0.6927	0.6876
Loss value, %	0.2004	0.1916	0.1932	0.2532	0.2476	0.2580
Evaluation time, c	481	462	475	468	469	474

The next stage is the evaluation of the model with the ResNet architecture with the following parameters:

- Number of epochs: 25;
- Batch size: 16;
- Optimizer: AdamW;
- Activation function: Swish;
- Dataset split: 70 % : 15 % : 15 %.

The evaluation results of this model are presented in Table 2.

Evaluation results of the ResNet model based on real images

Good lighting (300 lumens/m ²)						
	Distance from camera = 30			Distance from camera = 100		
	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°	Tilt angle = 0°	Tilt angle = 15°	Tilt angle = 30°
Accuracy, %	0.8380	0.8264	0.8209	0.8063	0.7937	0.7962
Loss value, %	0.1726	0.1791	0.1786	0.1916	0.1986	0.1949
Evaluation time, sec	532	561	568	541	545	559
Poor lighting (30 lumens/m ²)						
	Distance from camera = 30			Distance from camera = 100		
	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	angle = 0°	angle = 15°	angle = 30°	angle = 0°	angle = 15°	angle = 30°
Accuracy, %	0.8184	0.7931	0.7946	0.7631	0.7541	0.7591
Loss value, %	0.1801	0.1935	0.1985	0.2153	0.2236	0.2209
Evaluation time, sec	553	548	561	543	575	550

Summarizing the obtained results, it can be concluded that the two parameters with the greatest impact on gaze direction detection quality are lighting and distance to the camera. Accuracy decreases particularly sharply when both parameters are suboptimal simultaneously. The least influential parameter turned out to be head rotation.

The implementation of these results is carried out by a separate module within the learning management system. Based on prolonged gaze fixation, a specific semantic block (text, image, formulas) that causes the highest cognitive load is identified (Fig. 6) and therefore requires more in-depth study.



Fig. 6. Identification of a semantic block (green circle) in the educational content that generates the highest cognitive load

When prolonged gaze fixation is detected, the system automatically activates an adaptive scenario, offering the user additional, targeted information (e.g., definitions of terms, simplified explanations, visual examples) specifically related to the block that caused difficulty.

C onclusions

The study develops a conceptual model and a dynamic adaptation algorithm, where the gaze fixation duration - determined using the proposed ANN - acts as a trigger for providing supportive materials. Unlike existing approaches, it responds not to a static user profile but to the user's actual psychophysiological state-specifically, cognitive difficulties during learning.

It was established that a key indicator of difficulty in understanding material is gaze fixation time, which significantly exceeds the individual's baseline reading pace. When such a deviation is detected, the mechanism automatically triggers the provision of targeted supplementary information.

To provide the technological foundation for this mechanism, a comparative analysis of VGGNet and ResNet models for gaze direction detection was conducted. Experimentally, it was demonstrated that the ResNet model shows higher accuracy and stability under various conditions (e.g., 0.8380 vs. 0.8151 for ResNet and VGGNet, respectively, under good lighting and a 30 cm distance).

Critical factors affecting system reliability were identified: the greatest drop in gaze detection accuracy (down to 0.75–0.76 for ResNet) occurs under poor lighting (below 30 lumens) and increased distance from the camera (over 1 m). These factors must be considered when designing real-world inclusive systems.

The proposed approach enables a transition from static macro-personalization (adaptation based on the type of impairment) to dynamic micro-personalization (adaptation to a specific misunderstood term or formula), significantly enhancing the potential for effective learning.

List of references

1. Fernández-Batanero J. M., Montenegro-Rueda M., Fernández-Cerero J. *et al.* Assistive technology for the inclusion of students with disabilities: a systematic review. *Education Tech Research Dev.* 2022. 70. 1911–1930. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10127-7>.
2. Navas-Bonilla C. D. R., Guerra-Arango J. A., Oviedo-Guado D. A. & Murillo-Noriega D. E. (2025, February). Inclusive education through technology: a systematic review of types, tools and characteristics. *Frontiers in Education*. Vol. 10. P. 1527851. Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1527851>.
3. Ayeni O. O., Al Hamad N. M., Chisom O. N., Osawaru B. & Adewusi O. E. (2024). AI in education: A review of personalized learning and educational technology. *GSC Advanced Research and Reviews*. 18 (2). 261-271. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0062>.
4. Salas-Pilco S. Z., Xiao K. & Oshima J. (2022). Artificial Intelligence and New Technologies in Inclusive Education for Minority Students: A Systematic Review. *Sustainability*. 14 (20). 13572. <https://doi.org/10.3390/su142013572>.
5. Barkovska O., Ivashchenko H., Rosinskiy D. & Zakharov D. (2024). Educational training simulator for monitoring reading technique and speed based on speech-to-text (STT) methods. *Information Technologies and Learning Tools*. 103 (5). 21. DOI:10.33407/itlt.v103i5.5647.
6. Barkovska O., Liapin Y., Ruban I., Rosinskiy D. & Tkachov V. (2025). ANALYSIS OF NEURAL NETWORK HYPERPARAMETERS FOR PREDICTING USER GAZE DIRECTION IN ADAPTIVE LEARNING SYSTEMS. *Information Technologies and Learning Tools*. 108 (4). 263. DOI:10.33407/itlt.v108i4.6145.
7. Barkovska, O., Liapin, Y., Muzyka, T., Ryndyk, I., & Botnar, P. (2024). Gaze Direction Monitoring Model in Computer System for Academic Performance Assessment. *Information Technologies and Learning Tools*. 99 (1). 63. DOI:10.33407/itlt.v99i1.5503.
3. Ayeni, O. O., Al Hamad, N. M., Chisom, O. N., Osawaru, B., & Adewusi, O. E. (2024). AI in education: A review of personalized learning and educational technology. *GSC Advanced Research and Reviews*, 18(2), 261–271. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0062>
4. Salas-Pilco, S. Z., Xiao, K., & Oshima, J. (2022). Artificial intelligence and new technologies in inclusive education for minority students: A systematic review. *Sustainability*, 14(20), Article 13572. <https://doi.org/10.3390/su142013572>
5. Barkovska, O., Ivashchenko, H., Rosinskiy, D., & Zakharov, D. (2024). Educational training simulator for monitoring reading technique and speed based on speech-to-text (STT) methods. *Information Technologies and Learning Tools*, 103(5), 21. <https://doi.org/10.33407/itlt.v103i5.5647>
6. Barkovska, O., Liapin, Y., Ruban, I., Rosinskiy, D., & Tkachov, V. (2025). Analysis of neural network hyperparameters for predicting user gaze direction in adaptive learning systems. *Information Technologies and Learning Tools*, 108(4), 263. <https://doi.org/10.33407/itlt.v108i4.6145>
7. Barkovska, O., Liapin, Y., Muzyka, T., Ryndyk, I., & Botnar, P. (2024). Gaze direction monitoring model in computer system for academic performance assessment. *Information Technologies and Learning Tools*, 99(1), 63. <https://doi.org/10.33407/itlt.v99i1.5503>

МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ФІКСАЦІЇ ПОГЛЯДУ ДЛЯ ДИНАМІЧНОЇ АДАПТАЦІЇ КОНТЕНТУ В ІНКЛЮЗИВНОМУ НАВЧАННІ

Список використаних джерел

1. **Fernández-Batanero, J. M., Montenegro-Rueda, M., Fernández-Cerero, J., & García-Martínez, I. (2022).** Assistive technology for the inclusion of students with disabilities: A systematic review. *Educational Technology Research and Development*, 70(5), 1911–1930. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10127-7>
2. **Navas-Bonilla, C. D. R., Guerra-Arango, J. A., Oviedo-Guado, D. A., & Murillo-Noriega, D. E. (2025).** Inclusive education through technology: A systematic review of types, tools and characteristics. *Frontiers in Education*, 10, Article

ктуальність дослідження зумовлена тим, що переважна більшість існуючих інклюзивних освітніх технологій забезпечує лише базовий доступ до контенту, але не гарантує його ефективного засвоєння. Вони здебільшого пропонують статичну персоналізацію, що базована на заздалегідь визначеному профілі користувача (наприклад тип порушення). Основний недолік такого підходу – «сліпота» щодо динаміки реального навчального процесу. Система не здатна розпізнати, коли саме користувач стикається з миттєвим когнітивним переважанням або труднощами розуміння конкретного терміна чи формули. Це створює бар'єр, що призводить до фрустрації учня, втрати

мотивації та, як наслідок, поверхневого засвоєння матеріалу.

Метою роботи є розроблення та обґрунтування інноваційного механізму динамічної адаптації навчального контенту, який реагує на когнітивні труднощі користувача в режимі реального часу.

В основі дослідження лежить розроблення системи, що використовує технологію відстеження погляду (eye-tracking) для моніторингу взаємодії користувача з цифровим навчальним контентом. Важливим біометричним індикатором є час фіксації погляду на певних семантичних блоках (текст, зображення, формули).

У роботі вперше запропоновано механізм адаптації, що базований на такій гіпотезі: тривалість фіксації погляду є достовірним маркером виникнення труднощів із розумінням або підвищеного когнітивного навантаження. Із детектуванням тривалої фіксації система автоматично активує адаптивний сценарій - пропонує користувачеві додаткову, таргетовану інформацію (наприклад визначення термінів, спрощені пояснення, візуальні приклади), що стосується саме того блока, який викликав труднощі. Цей підхід дає змогу перейти від макроперсоналізації (на рівні профілю) до мікроперсоналізації (на рівні реального часу), створюючи більш чутливе та ефективне інклюзивне навчальне середовище.

Ключові слова: мультимодальні системи, асистивні технології, контекстно-залежна взаємодія, люди з інвалідністю, персоналізовані інтерфейси.

About the authors

Барковська Оlesia Юрївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: olesia.barkovska@nure.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Olesia Barkovska, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: olesia.barkovska@nure.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Стаття надійшла 23.11.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.01.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

ЗМІЙ С. О., к.т.н., доцент,
 ХІСМАТУЛІН В. Ш., к.т.н., професор,
 СІРОКЛИН І. М., к.т.н., доцент,
 СОСУНОВ О. О., к.т.н., доцент
 (Український державний університет залізничного транспорту)

Оцінювання потенціалу впровадження альтернативних джерел енергії для залізничної автоматики в Україні

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну задачу підвищення стійкості електропостачання об'єктів залізничної автоматики України в умовах воєнних дій, техногенних загроз і системних порушень роботи централізованої енергосистеми. Показано, що традиційна модель гарантованого електропостачання пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), побудована на двопробному живленні від зовнішніх мереж із резервуванням дизель-генераторними агрегатами, формально відповідає вимогам I категорії надійності, однак на практиці виявляє обмежену здатність щодо функціонування в умовах тривалих масових відключень електроенергії та порушення логістики пального.

Обґрунтовано необхідність переходу від парадигми надійності до парадигми стійкості (resilience), яка передбачає здатність об'єктів СЦБ зберігати працездатність в автономному режимі протягом тривалого часу та швидко відновлювати функціонування після зовнішніх впливів. Як основний інструмент такого переходу розглянуто впровадження децентралізованих гібридних систем енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії з використанням фотоелектричних станцій, малих вітроенергетичних установок і систем накопичення енергії.

Проаналізовано розрахункові електричні навантаження постів електричної централізації, визначено характер базових і пікових режимів споживання, а також обґрунтовано вимоги щодо потужності інверторного обладнання та ємності акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи протягом не менше 48 годин. Оцінено сонячний і вітровий енергетичний потенціал України з урахуванням регіональних і сезонних особливостей, що дало змогу сформулювати диференційовані рекомендації щодо конфігурації гібридних систем для різних кліматичних зон.

Показано доцільність використання двосторонніх фотоелектричних модулів на основі технології N-type TOPCon із туннелювою архітектурою з'єднання елементів, які забезпечують підвищену ефективність у зимовий період, кращу роботу за умов слабого освітлення та підвищену стійкість до вібраційних навантажень, характерних для залізничної інфраструктури. Запропонована методика дає змогу підвищити енергетичну автономність об'єктів СЦБ, знизити експлуатаційні витрати і забезпечити додатковий екологічний ефект за рахунок скорочення викидів вуглекислого газу.

Ключові слова: залізнична автоматика, електропостачання I категорії, відновлювані джерела енергії, фотоелектричні станції, вітроенергетичні установки, системи накопичення енергії, гібридні енергосистеми, стійкість критичної інфраструктури.

Вступ

Сучасна залізнична інфраструктура України функціонує в умовах безпрецедентних викликів, спричинених цілеспрямованими атаками на енергетичні об'єкти. Традиційна модель живлення постів електричної централізації (ЕЦ), що спирається на централізовану мережу, продемонструвала критичну вразливість через одночасне знеструмлення обох незалежних фідерів. Перетворення дизель-генераторним агрегатом (ДГА) енергії на основне джерело створює логістичні ризики щодо постачання пального та демаскує розташування об'єктів через тепловий і шумовий слід. Необхідним є негайний

перехід від концепції надійності до парадигми стійкості (resilience) через впровадження децентралізованих джерел [1–3, 7].

Практичне завдання полягає в забезпеченні гарантованої автономності систем СЦБ як фундаменту безпеки руху поїздів. Модернізація через інтеграцію сонячної генерації та систем накопичення (BESS) дає змогу об'єктам зберігати функціональність навіть у режимі «енергетичного острова».

1. Принципи функціонування та категоризація надійності електропостачання пристроїв СЦБ

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Системи сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) є фундаментом безпеки руху на залізничному транспорті. Безперебійна та коректна робота безпосередньо впливає на запобігання аварійним ситуаціям, забезпечення встановленої пропускнує спроможності дільниць і виконання графіка руху поїздів. Зважаючи на це, нормативні документи України встановлюють найвищі вимоги щодо надійності електропостачання цих систем. Детальні вимоги щодо електропостачання пристроїв СЦБ конкретизовані в галузевих інструкціях, зокрема «Інструкції з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ)» ЦЕ-0033. За цими документами та загальнодержавними нормами, пристрої СЦБ належать до споживачів електричної енергії І категорії надійності. Це означає, що перерва в їхньому електропостачанні може призвести до загрози життю людей, значних матеріальних збитків і порушення функціонування критичної інфраструктури держави. Більш того, найбільш відповідальні об'єкти, такі як пости ЕЦ на станціях із кількістю стрілок понад 30, а також диспетчерські центри, виділені в особливу групу І категорії. Для таких споживачів необхідно забезпечити безперебійне живлення від трьох незалежних взаємно резервованих джерел. Два з них є зовнішніми джерелами (фідерами), а третє – місцевим автономним джерелом, зазвичай ДГА [4–6].

Отже, уся архітектура системи електроживлення СЦБ побудована за принципом глибокого резервування для мінімізації ймовірності знеструмлення. Будь-яка модернізація чи впровадження нових технологій мають не просто відповідати цим вимогам, а й посилювати їх, особливо в умовах нових загроз, що не були повною мірою враховані під час розроблення чинної нормативної бази.

2. Архітектура типової схеми живлення поста ЕЦ

Стандартна схема електропостачання пристроїв СЦБ на залізницях України є багаторівневою системою, розробленою для забезпечення максимальної надійності відповідно до вимог І категорії. Вона включає три основні ешелони живлення: основний, резервний, аварійний.

Основне живлення реалізовано за схемою двопробеневого живлення від щонайменше двох незалежних джерел. Зазвичай це дві високовольтні повітряні лінії (ПЛ) напругою 10 кВ (у деяких випадках 35 кВ), що проходять уздовж залізничних колій. Ці лінії мають двобічне живлення від різних підстанцій, що знижує ймовірність їхнього одночасного знеструмлення. На електрифікованих дільницях живлення ПЛ СЦБ зазвичай здійснюване від тягових підстанцій, а на неелектрифікованих – від підстанцій регіональних енергосистем або інших відомств. На постах ЕЦ напругу 10 кВ знижують до

робочих рівнів (380/220 В) за допомогою трансформаторних підстанцій. Перемикання між двома основними фідерами відбувається автоматично за допомогою пристроїв автоматичного вводу резерву (АВР).

Резервне живлення забезпечено автономним джерелом, яке вводять у дію у випадку зникнення напруги на обох основних фідерах. Стандартним рішенням для цього є дизель-генераторний агрегат із системою автоматичного запуску. Критичною вимогою є забезпечення запасу пального, який має гарантувати безперервну роботу ДГА протягом щонайменше двох діб.

Аварійне живлення є останнім порогом захисту і призначене для забезпечення безперебійності роботи пристроїв СЦБ на короткий проміжок часу, необхідний для перемикання між фідерами або запуску та виходу на робочий режим ДГА. Цю функцію виконує акумуляторна батарея (АБ), яка постійно знаходиться в буферному режимі. Вона миттєво бере на себе навантаження за будь-якого зникнення напруги змінного струму, живлячи найбільш відповідальні кола (релейні схеми, апаратуру керування) через перетворювачі DC/AC. Найчастіше використовують стаціонарні кислотні акумулятори.

Отже, існуюча архітектура є класичною схемою гарантованого живлення, що добре зарекомендувала себе в умовах стабільної роботи централізованої енергосистеми. Однак її ефективність суттєво залежить від пошкодження енергоінфраструктури, надійності зовнішніх джерел і логістики пального для ДГА.

3. Розрахункові навантаження та енергоспоживання постів ЕЦ

Енергоспоживання поста електричної централізації є комплексним і складається з декількох важливих компонентів, що мають різний режим роботи.

Складові навантаження поста ЕЦ:

1. Релейна апаратура та схеми керування. Це основа переважної більшості систем СЦБ, що працює в безперервному режимі. Навантаження від релейних стативів є відносно стабільним і складає значну частину базового енергоспоживання поста.

2. Стрілочні електроприводи. Це найбільш потужні, але короткочасно працюючі споживачі. Переведення однієї стрілки триває кілька секунд, але в моменти пікової маневрової роботи може відбуватися одночасне переведення кількох стрілок. Типовий електродвигун стрілочного переводу, наприклад МСП-0,25, має номінальну потужність 250 Вт, але його пускові струми значно вищі.

3. Рейкові кола. Системи контролю вільності ділянок колії, які споживають енергію постійно. Потужність одного рейкового кола є невеликою (близько 11 Вт), але на станції їх можуть бути десятки.

4. Світлофори. Споживання залежить від типу ламп (лампи розжарювання чи світлодіодні) і сигнального показання. Світлодіодні світлофори є значно більш енергоефективними.

5. Допоміжні системи. Освітлення приміщень поста ЕЦ, опалення (у зимовий період), вентиляція, апаратура зв'язку та робочі місця персоналу.

Для прикладу наведемо орієнтовний розрахунок навантаження для типового поста ЕЦ малої станції (до 15 стрілок). Загальне базове навантаження (реле, рейкові кола, чергове освітлення) можна оцінити в межах 1.5-2.0 кВт. Пікове навантаження виникає під час переведення стрілок (потужність двигуна 250-600 Вт, з урахуванням пускових струмів пікова потужність може сягати 1-1.5 кВт на привод) загальна потужність може короткочасно зростати до 5-7 кВт. Середньодобове споживання такого об'єкта з урахуванням роботи допоміжних систем оцінюють у діапазоні 40-60 кВт·год. Ці розрахункові дані є основою для вибору потужності резервного ДГА, а в нашому випадку – для визначення необхідної потужності сонячної електростанції та ємності системи накопичення енергії.

4. Вразливості поточної централізованої моделі в умовах воєнних дій і техногенних ризиків

Існуюча система електропостачання СЦБ, розроблена в умовах відносно стабільної та передбачуваної роботи національної енергосистеми, продемонструвала низку критичних вразливостей в умовах повномасштабних воєнних дій. Цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру України виявили фундаментальну слабкість централізованої моделі.

Із лютого 2022 року енергетична інфраструктура, зокрема та, що належить АТ «Укрзалізниця», стала ціллю систематичних атак. Зафіксовано численні удари по об'єктах у Сумській, Полтавській, Дніпропетровській, Харківській та інших областях. За звітом Світового банку, транспортний сектор України зазнав колосальних збитків, а залізнична інфраструктура становить значну їхню частину. Ці атаки призводять до масштабних і довготривалих відключень електроенергії, що безпосередньо впливає на роботу СЦБ. Основна проблема полягає в тому, що обидва незалежні фідери, від яких живляться пости ЕЦ, часто підключені до підстанцій, що входять до єдиної регіональної енергосистеми. Системна атака на головні вузли цієї системи (генеруючі потужності,

магістральні підстанції) призводить до одночасного знеструмлення обох фідерів на невизначений термін.

У таких умовах єдиним джерелом живлення стає ДГА. Це кардинально змінює його роль. Із резервного джерела, що працює кілька годин на рік, він перетворюється на основне джерело, що має працювати в безперервному режимі днями, а іноді й тижнями. Це породжує каскад нових ризиків.

Виникає критична потреба в регулярному та безперебійному постачанні дизельного пального, що в умовах бойових дій, пошкоджених доріг і дефіциту палива стає надскладним завданням. Робота в безперервному режимі значно прискорює знос дизель-генератора, збільшує ймовірність технічних відмов і потребує значно частішого технічного обслуговування. Вартість електроенергії, виробленої ДГА, у разі перевищує вартість мережевої, що призводить до значного зростання експлуатаційних витрат. Робота ДГА також створює шум і тепловий слід, що може демаскувати розташування критично важливих об'єктів інфраструктури.

Отже, виникла фундаментальна суперечність між нормативною вимогою щодо абсолютної надійності живлення СЦБ і практичною вразливістю централізованої моделі, яка спирається на стабільність зовнішньої енергосистеми. Існуюча система, що формально відповідає стандартам, розробленим для мирного часу, на практиці виявилася крихкою перед сучасними гібридними загрозами. Це потребує переходу від парадигми надійності (здатності працювати без збоїв у стабільних умовах) до парадигми стійкості (здатності витримувати зовнішні шоки, зберігати функціональність в автономному режимі та швидко відновлюватися). Впровадження децентралізованих джерел енергії є важливим кроком на цьому шляху.

5. Оцінювання потенціалу впровадження альтернативних джерел енергії для об'єктів АТ «Укрзалізниця»

Перехід до децентралізованої моделі енергозабезпечення об'єктів СЦБ потребує ретельного оцінювання потенціалу доступних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на території України. Основними технологіями, що розглядають, є сонячна та вітрова енергетика, кожна з яких має свої переваги та обмеження в контексті застосування на залізничній інфраструктурі.

Потенціал сонячної енергетики

Україна має сприятливі кліматичні умови для розвитку сонячної енергетики. За даними «Атласу енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України», середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на 1 м² горизонтальної поверхні, становить від 1070 кВт·год/м² у північних областях до понад 1400

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

кВт·год/м² на півдні країни, зокрема в Криму та на узбережжях Чорного і Азовського морів (рис. 1) [8].

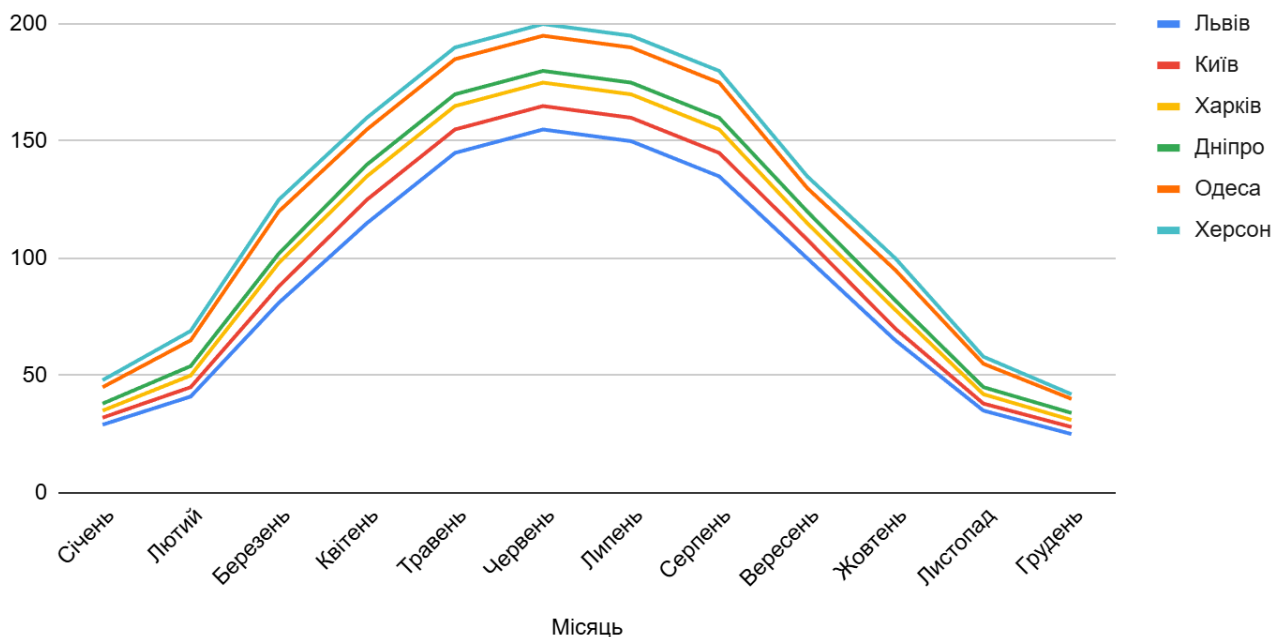


Рис. 1. Середньомісячна генерація електроенергії з 1 м² сонячних панелей

Для об'єктів залізничної інфраструктури, які рівномірно розподілені по всій території країни, важливо аналізувати не лише загальнорічні, а й сезонні та добові коливання сонячної інсоляції. Наприклад, для центральних регіонів (м. Київ) середньодобова сумарна сонячна радіація варіюється від мінімальних значень 0.86-1.07 кВт·год/м² у грудні-січні до максимальних 5.31-5.34 кВт·год/м² у червні-липні. Цей показник, також відомий як кількість пікових сонячних годин, є основним для розрахунку потенційної генерації фотоелектричної станції (ФЕС). Сезонна нерівномірність є головним викликом, який необхідно враховувати для проектування гібридних систем, оскільки зимова генерація може бути в п'ять-шість разів нижчою за літню.

Важливою перевагою для розміщення ФЕС на об'єктах АТ «Укрзалізниця» є наявність значних потенційних площ. Пості ЕЦ, вокзали, адміністративні та технічні споруди мають дахи, які можуть бути використані для встановлення сонячних панелей.

На багатьох станціях є вільні земельні ділянки, придатні для розміщення наземних ФЕС. Залізничні колії мають широкі смуги відведення, які можуть бути використані для встановлення сонячних панелей уздовж колій, що є перспективною світовою практикою.

Ураховуючи високий потенціал інсоляції та наявність придатних площ, сонячна енергетика є

найбільш перспективною та універсальною технологією для децентралізації живлення об'єктів СЦБ по всій території України.

На сьогодні світова фотоелектрична промисловість перейшла до масового виробництва N-тип елементів, що поступово витісняють застарілу технологію P-типу PERC.

PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) тривалий час була стандартом завдяки низькій ціні. Проте її ефективність обмежена 23-24 %, а панелі мають вищий рівень щорічної деградації (0.6-0.8 %) і чутливість до світлоіндукованої деградації (LID).

Технологія TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) є лідером ринку (близько 70 % виробництва у 2024 році). Використовує ультратонкий шар оксиду для зменшення втрат на рекомбінацію електронів. ККД серійних модулів сягає 24-25 %, кращій температурний коефіцієнт (-0.30 %/°C), вищій показник двосторонності (85 %), що критично для вловлювання відбитого світла [9–11].

Технологія HJT (Heterojunction Technology) поєднує кристалічний і аморфний кремній, забезпечуючи найвищу ефективність (>26 %) і найкращу роботу за високих температур (-0.24 %/°C). Проте вища вартість (+15-25 %) і складність виробництва поки обмежують її використання преміальними проектами.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Shingled (гонтове з'єднання) технологія, де сонячні комірки нарізані смужками та з'єднані внахлест за допомогою гнучкого струмопровідного клею (ECA). Це дає змогу прибрати мідні шини (busbars), збільшити площу поглинання світла та кардинально підвищити стійкість модуля до механічних напруг.

Потенціал вітрової енергетики

Вітрова енергетика є другим за значущістю напрямом ВДЕ в Україні. За «Атласом», країна має значний вітровий потенціал, особливо в Карпатському та Кримському регіонах, а також на узбережжях Чорного і Азовського морів. Для ефективної роботи промислових вітроелектростанцій (ВЕС) необхідна середньорічна швидкість вітру понад 5 м/с.

Для потреб живлення окремих об'єктів СЦБ ідеться не про великі ВЕС, а малі вітроенергетичні установки (ВЕУ) потужністю до 50 кВт. Для їхньої роботи достатньо середньорічної швидкості вітру близько 4.5-5 м/с. Такі умови наявні на значній частині території України, особливо на відкритих ділянках, характерних для залізничних перегонів [12].

Таблиця 1

Потенціал ВЕУ

Регіон	Осінь-зима (жовтень-березень)	Весна-літо (квітень-вересень)
Причорномор'я / Приазов'я	Дуже високий потенціал (стабільні та сильні вітри)	Помірний потенціал
Карпатський регіон	Високий потенціал (особливо на перевалах і вершинах)	Помірний потенціал
Центральні та Східні регіони	Помірний потенціал	Низький потенціал

6. Порівняльний аналіз технологій для залізничної інфраструктури

Вибір оптимальної технології для живлення об'єктів СЦБ має бути базований на специфічних умовах їх експлуатації: високі вимоги щодо надійності, розподілений характер об'єктів, обмеженість простору та необхідність мінімального обслуговування.

Сонячні електростанції мають високу надійність через відсутність рухомих частин, мінімальні вимоги щодо обслуговування (періодичне очищення), безшумність, модульність (легко масштабувати), передбачуваність генерації в короткостроковій перспективі. Проте мають залежність від сонячного світла (відсутність генерації вночі), значну сезонну та добову нерівномірність

Головною перевагою вітрогенерації є її здатність виробляти електроенергію незалежно від часу доби, а також вища продуктивність в осінньо-зимовий період, коли сонячна активність є мінімальною (табл. 1). Це створює потенціал для синергії та взаємної компенсації з використанням вітрових і сонячних установок у складі єдиної гібридної системи.

Однак впровадження ВЕУ на об'єктах СЦБ має і суттєві обмеження. ВЕУ потребують вільного простору та відсутності перешкод (будівель, лісосмуг), що обмежує їх використання на станціях, розташованих у щільній забудові. Наявність рухомих частин потребує більш складного та регулярного технічного обслуговування порівняно з сонячними панелями. Вібрації від роботи ВЕУ можуть негативно впливати на чутливу апаратуру СЦБ та колійну інфраструктуру. Робота вітрогенератора створює шум, що може бути проблемою для розміщення поблизу житлових зон.

генерації, потребу у відносно великих площах для встановлення.

Аналіз потенціалу відновлюваної енергетики для об'єктів залізничної автоматики України демонструє значну територіальну нерівномірність, що обумовлює необхідність диференційованого підходу щодо проектування гібридних систем енергозабезпечення. Основні відмінності в генерації визначені широтою розташування, кліматичними особливостями регіону та сезонними коливаннями сонячної інсоляції.

Вітроенергетичні установки здатні генерувати електроенергію цілодобово, вища генерація в зимовий період, менша площа безпосередньо під установкою. Проте мають меншу надійність через наявність механічних вузлів, потребу в регулярному ТО, шум і

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

вібрації, залежність від стабільності вітру, вищі вимоги щодо фундаменту і монтажу.

На основі цього порівняння можна зробити висновок, що для переважної більшості постів ЕЦ та інших об'єктів СЦБ сонячні електростанції є більш доцільним та універсальним базовим рішенням. Вони краще відповідають вимогам щодо надійності та низьких експлуатаційних витрат.

Водночас потенціал ВДЕ в Україні є достатнім, але нерівномірним, що диктує необхідність розроблення регіонально адаптованої стратегії впровадження. Універсальне рішення «тільки ФЕС» може бути неоптимальним для всіх регіонів. Наприклад, на відкритих ділянках у південних і західних областях, де стабільний вітровий потенціал, комбінація сонячної та вітрової генерації може значно згладити сезонні та добові коливання. Така гібридна модель, де базовим ВДЕ є сонячні панелі, а на ділянках із високим вітровим потенціалом вони доповнені малими ВЕУ, створює синергетичний ефект і підвищує загальний коефіцієнт заміщення мережевої енергії, наближаючи об'єкт до повної енергетичної автономності.

Для забезпечення гарантованого живлення станційної автоматики в Україні найбільш доцільним є використання двосторонніх (Bifacial) модулів на основі N-type TOPCon з архітектурою Shingled. Ця технологія демонструє найкращу ефективність в умовах слабкого освітлення (low-light), характерного для українських зим, генеруючи на 3-5 % більше енергії на світланку і в сутінках порівняно з PERC. Залізничний баласт (щебінь) і сніговий покрив мають високий коефіцієнт відбиття (альbedo). Двосторонні TOPCon модулі здатні вловлювати це світло тильною стороною, що дає додатковий приріст генерації до 30 % без збільшення площі. Крім того, традиційні панелі з паяними шинами схильні до появи мікротріщин в умовах вібрації. Гонтове з'єднання елементів завдяки своїй гнучкості та відсутності жорстких шин є набагато стійкішим до вібраційних і динамічних навантажень, що підтверджено випробуваннями на надійність [9–11].

Обґрунтування та оцінювання найдоцільнішої технології для завдань залізниці

Ефективність функціонування постів електричної централізації в автономному режимі визначена сукупним потенціалом сонячної та вітрової енергії, що мають виражену регіональну специфіку. Для північних областей (умовна станція на 15 стрілок у Київській області) характерним є критичне

зниження сонячної генерації взимку, що потребує інтеграції вітроенергетичних установок для балансування системи. На півдні (Херсонська область) високий рівень інсоляції дає змогу мінімізувати площу фотоелектричних панелей, проте стабільний вітровий потенціал прибережних зон робить використання ВЕУ економічно доцільним для цілодобового підзаряджання систем накопичення.

Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної станції (ФЕС) базований на необхідності покриття середньодобового споживання

$$W_{\text{доба}} \approx 50 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$P_{\text{ФЕС}} = \frac{W_{\text{доба}}}{H_{\text{інс}} \cdot \eta}$$

де $H_{\text{інс}}$ – кількість пікових сонячних годин, що для півночі взимку становить ≈ 1.0 год, а для півдня ≈ 1.5 год;

η – коефіцієнт корисної дії системи (≈ 0.85).

Розраховують виробіток вітроенергетичної установки потужністю до 50 кВт за формулою

$$P_w = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

де ρ – щільність повітря;

A – площа ометання ротора;

v – швидкість вітру, яка для ефективної роботи малих ВЕУ має становити не менше 4.5-5 м/с;

C_p – коефіцієнт використання потужності вітру [12].

Розміщують генеруюче обладнання на даху поста ЕЦ і критих пасажирських платформах для забезпечення децентралізації та стійкості до пошкоджень. На умовній станції з 15 стрілками встановлюють 40–45 фотоелектричних модулів Bifacial типу, що дають змогу вловлювати відбите світло від щебеню та снігу, додаючи до 30 % генерації. Малу ВЕУ вертикального типу монтують на технічних щоглах або краях платформ, де забезпечена відсутність перешкод для вітрових потоків (рис. 2).



Рис. 2. Розміщення альтернативних джерел на даху поста ЕЦ

Для підвищення ефективності в умовах півночі пропонувано використання систем ручного сезонного регулювання кута нахилу панелей α . Це дає змогу персоналу двічі на рік оптимізувати кут:

– взимку кут встановлений на рівні $60 - 65^\circ$, що максимізує поглинання низького сонця та запобігає накопиченню снігового покриву;

– влітку кут змінений на $30 - 35^\circ$ для перпендикулярного падіння променів у зеніті.

Змінюють кут електромеханіки СЦБ згідно з регламентом технічного обслуговування.

Для детального порівняльного аналізу та розроблення методичних рекомендацій з енергозабезпечення постів електричної централізації (ЕЦ) на 15 стрілок розраховано параметри гібридної автономної системи для декількох міст України. В основі розрахункової моделі лежить вимога щодо забезпечення повної автономності об'єкта протягом 48 годин за умови середньодобового енергоспоживання

$$W_{\text{доба}} = 50 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Методологія регіонального розрахунку

Таблиця 2

Результати розрахунків для міст України

Місто	$H_{\text{рік}}$, год/день	$P_{\text{ФЕС}}$, кВт	$C_{\text{СНЕ}}$, кВт·год	$P_{\text{інв}}$, кВт	Доцільність ВЕС
Львів	2.95	20.0	111.1	10	Висока (зимовий дефіцит)

Для кожного міста визначено середньорічний показник пікових сонячних годин $H_{\text{рік}}$ на основі даних енергетичного потенціалу та сезонних графіків генерації. Встановлену потужність фотоелектричної станції розраховано за формулою $P_{\text{ФЕС}} = \frac{W_{\text{доба}}}{H_{\text{рік}} \cdot \eta}$, де

коефіцієнт корисної дії системи η прийнято на рівні 0.85 для врахування втрат для перетворення та передавання енергії.

Ємність системи накопичення енергії (СНЕ) для всіх локацій залишається незмінною, оскільки вона визначена виключно графіком навантаження та вимогою щодо автономності:

$$C_{\text{СНЕ}} = \frac{50 \cdot 2}{0.9} \approx 111.1 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \text{ де } 0.9 - \text{ допустима глибина розряду акумуляторів LiFePO4.}$$

Потужність інверторного обладнання $P_{\text{інв}}$ вибрано на рівні 10 кВт для надійного покриття пікового навантаження 7 кВт з одночасним переведенням стрілочних приводів. Результати розрахунку для різних міст України зведено до табл. 2.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Київ	3.22	18.3	111.1	10	Середня (балансування)
Харків	3.42	17.2	111.1	10	Середня (зимовий вітер)
Дніпро	3.70	15.9	111.1	10	Низька
Одеса	3.97	14.8	111.1	10	Висока (прибережний вітер)
Херсон	4.13	14.2	111.1	10	Середня (стабільність)

Результати демонструють суттєву територіальну нерівномірність сонячного потенціалу, що потребує диференційованого підходу щодо проєктування систем залізничної автоматики. Для північних і західних дільниць (Львів, Київ) характерним є критичне зниження інсоляції в зимовий період, що робить впровадження малої ВЕС обов'язковим елементом для підтримки заряду СНЕ в умовах короткого світлового дня.

На півдні (Одеса, Херсон) висока інтенсивність сонячної радіації дає змогу оптимізувати площі розміщення фотопанелей на дахах постів ЕЦ, використовуючи вивільнені площі критих платформ для встановлення двосторонніх bifacial модулів, які ефективно вловлюють відбите світло від щебеню. Для об'єктів у Харкові та Львові стратегічно важливим є застосування систем ручного регулювання кута нахилу панелей, що дає змогу силами персоналу СЦБ двічі на рік змінювати кут від 35° до 65° , значно підвищуючи ефективність системи у найбільш складні зимові місяці.

Використання наведеної методики допомагає не лише забезпечити гарантовану стійкість критичної інфраструктури АТ «Укрзалізниця», а й досягти значного екологічного ефекту через скорочення викидів CO_2 на рівні понад 11 т/р. для кожної модернізованої станції.

Список використаних джерел

1. OECD. Resilience of Critical Infrastructure. Paris: OECD Publishing, 2022. https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure_896f59cf.html.
2. World Bank; Government of Ukraine; European Union; United Nations. Second Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2):

February 2022 - February 2023 (English). Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>.

3. ENTSO-E. Power System Resilience and Security. Brussels, 2022. 42 p.
4. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля, 2017. 617 с.
5. Правила технічної експлуатації залізниць України: затв. Наказом Міністерства транспорту України від 20.12.1996 р. № 411. Київ: Дельта, 2025. 256 с.
6. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦЕ-0033: затв. Наказом Укрзалізниці від 09.02.2012 р. Київ, 2012. 142 с.
7. ISO 8528. Reciprocating internal combustion engine driven generating sets. ISO, 2021. 62 p.
8. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С. О. Кудря та ін.; ІВЕ НАН України. Вид. 2-ге. Київ, 2020. 45 с.
9. ITRPV 2024. International Technology Roadmap for Photovoltaics. 15th ed. 2024. 88 p.
10. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. Freiburg, Freiburg, 31 October 2025 www.ise.fraunhofer.de. 2024. 56 p.
11. Jäger-Waldau A. PV Technology Status and Prospects. 2024.
12. IEC 61400-2. Small Wind Turbines. IEC, 2013. 156 p.

References

1. **OECD. (2022). Resilience of critical infrastructure.** OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure_896f59cf.html
2. **World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2023). Second Ukraine rapid damage and needs**

- assessment (RDNA2): February 2022 - February 2023. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>
3. **ENTSO-E. (2022).** *Power system resilience and security.* ENTSO-E.
 4. **Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. (2017).** Minenerhovuhillia [in Ukrainian].
 5. **Ministry of Transport of Ukraine. (2025).** *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy [Rules for technical operation of the railways of Ukraine]* (Order No. 411). Delta [in Ukrainian].
 6. **Ukrzaliznytsia. (2012).** *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu prystroiv elektropostachannia system syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia (STsB): Tse-0033 [Instruction for maintenance and repair of power supply devices for signaling, centralization and blocking systems (SCB): CE-0033]* (Order dated February 9, 2012) [in Ukrainian].
 7. **International Organization for Standardization. (2021).** *Reciprocating internal combustion engine driven generating sets (ISO Standard No. 8528).* <https://www.iso.org/standard/72557.html>
 8. **Kudria, S. O., et al. (2020).** *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of renewable energy potential of Ukraine]* (2nd ed.). Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
 9. **ITRPV. (2024).** *International technology roadmap for photovoltaics (ITRPV): 15th edition.*
 10. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2025).** *Photovoltaics report.* <https://www.ise.fraunhofer.de>
 11. **Jäger-Waldau, A. (2024).** *PV technology status and prospects.* European Commission Joint Research Centre.
 12. **International Electrotechnical Commission. (2013).** *Wind energy generation systems - Part 2: Small wind turbines (IEC Standard No. 61400-2).*
- I reliability requirements but demonstrates limited practical effectiveness during prolonged blackouts and fuel supply disruptions.*
- The necessity of shifting from the classical reliability paradigm to the resilience paradigm is substantiated. This paradigm emphasizes the ability of critical railway automation facilities to maintain functionality in autonomous mode for extended periods and to rapidly recover after external shocks. As a key technological solution, the implementation of decentralized hybrid power supply systems based on renewable energy sources is considered, combining photovoltaic power plants, small wind energy converters, and battery energy storage systems.*
- The electrical load profiles of electric interlocking posts are analyzed, including base and peak consumption modes. Technical requirements for inverter capacity and battery storage size necessary to ensure at least 48 hours of autonomous operation are justified. An assessment of solar and wind energy potential across Ukraine is performed, taking into account regional and seasonal variability, which enables the development of region-specific configurations of hybrid energy systems.*
- The study demonstrates the feasibility of using bifacial photovoltaic modules based on N-type TOPCon technology with shingled cell architecture. These modules offer improved performance under low-light winter conditions, higher resistance to vibration loads, and enhanced energy yield due to reflected radiation from railway ballast and snow cover. The proposed methodology increases the energy autonomy of railway signalling facilities, reduces operational costs, and provides an additional environmental benefit through the reduction of carbon dioxide emissions.*
- Keywords:** railway signalling systems; Category I power supply; renewable energy sources; photovoltaic power plants; wind energy systems; battery energy storage systems; hybrid power systems; critical infrastructure resilience.

Zmii S., Khismatulin V., Sosunov A., Siroklyn I. Assessment of the potential for implementing alternative energy sources for railway automation in Ukraine

Abstract. The article addresses a relevant scientific and applied problem of enhancing the power supply resilience of railway signalling and interlocking systems in Ukraine under conditions of military actions, technogenic threats, and large-scale disruptions of centralized power grids. It is shown that the traditional guaranteed power supply architecture for signalling, centralization, and blocking (SCB) systems-based on dual-feed external networks with diesel generator backup-formally complies with Category

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.

Хісмамулін Володимир Шайдуллович, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сіроклин Іван Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Tel.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: seroklin@kart.edu.ua.

Сосунов Олександр Олексійович, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Zmii Serhii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

Khismatulin V., Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Sosunov Aleksandr, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Siroklyn Ivan, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Tel.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: seroklin@kart.edu.ua.

Стаття надійшла 05.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

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

Features of the use of brushless motors in traction rolling stock

Abstract. The review study examines a range of technical, design, and operational features of modern brushless valve and asynchronous traction electric machines, which are widely used in locomotive construction and transport electric drives. The object of research is electromagnetic, thermal, and energy processes occurring in brushless valve and asynchronous traction motors during their operation in traction rolling stock systems. The design features of brushless traction motors are analyzed, which are characterized by high energy efficiency, increased specific power, the absence of a mechanical collector, as well as the ability to provide wide ranges of torque and speed control while minimizing maintenance. The specifics of working processes in valve and asynchronous motors have been identified, which are determined by the principles of electromagnetic conversion, control methods, and the response of an electric machine to variable loads. Compare the features of electromagnetic torque formation, commutation, and thermal modes of these motors in traction systems. Special attention is paid to the issues of regulating the rotation speed of asynchronous traction motors, which is implemented using frequency converters with scalar, vector, and direct control methods. The advantages of vector control, which ensures dynamic stability and maximum utilization of the motor's overload capacity in traction and recuperation modes, have been identified. The structural and technological features of designing asynchronous traction motors for locomotives have been studied, in particular the requirements for the magnetic system, rotor strength, cooling systems, and electrical insulation materials. The trends in the development of modern traction electric machines are summarized, in particular, the introduction of energy-efficient materials, the expansion of the operating frequency range, the improvement of thermal reliability, and the integration of the motor with power electronics into single electromechanical modules.

Keywords: brushless traction motor, electric machine, locomotive, traction electric drive, asynchronous motor, valve motor, converter, energy efficiency.

Relevance of the research topic.

The relevance of researching the features of using brushless (valve and asynchronous) traction motors in rail transport is due to the need to improve the energy efficiency, reliability, and environmental friendliness of rolling stock. Modern transportation requirements are driven by the need to reduce operating costs, increase maintenance intervals, and ensure stable operation under high loads. Brushless motors, thanks to the absence of a commutator-brush assembly, demonstrate improved dynamic performance, longer service life, and lower maintenance costs. Research into their design features, operating modes, and control methods is important for the development of efficient electric traction systems, the modernization of locomotives, and the introduction of innovative technical solutions in rail transport.

Introduction.

The current development of rail transport is characterized by increasing demands for energy efficiency [1–4], reliability [5–7], and environmental friendliness [8–10] of traction electric drives. In the context of the transition to intelligent control systems and the growth in

transport volumes, it is becoming increasingly important to optimize traction electric drives, which determine the dynamic, energy, and operational properties of rolling stock [11, 12].

An important trend in recent decades has been the widespread integration of semiconductor converters into traction systems, which has opened up opportunities for the use of various types of electric motors, primarily valve and asynchronous motors [13–15]. These two types of electric machines are currently considered the dominant solutions for locomotives, electric trains, subway trains, trams, and city electric buses, and comparing them is a key step in the technical and economic justification of the choice of power equipment (Table 1).

Internal switching		External switching	
With mechanical switching (collector)		With electronic switching (valve)	Asynchronous motors Synchronous motors
Alternating current	Direct current	Alternating current	Direct current
Universal; Repulsive	DC commutator motor with different excitation windings; Permanent magnet DC commutator motor	Brushless DC motor; Valve jet motor; Synchronous jet motor with salient pole rotor	Asynchronous motor with squirrel cage rotor; Asynchronous motor with phase rotor Synchronous motor with excitation winding; Synchronous motor with permanent magnets; Synchronous motor with built-in permanent magnets; Synchronous motor with surface-mounted permanent magnets; Hybrid synchronous jet motor; Synchronous jet motor with permanent magnets; Synchronous jet motor with permanent magnets, reactive-hysteresis; Stepper motor
Simple electronics	Straighteners	More complex electronics	Complex electronics

Valve motors, which operate in conjunction with inverter commutation and modern control systems, combine high dynamic characteristics with the absence of a mechanical commutator, which has traditionally been a factor in increased wear in classic DC motors [17, 18]. Thanks to their ability to precisely control electromagnetic torque, these motors are gaining popularity in areas of rail transport where it is important to achieve a wide range of speed control and limit energy losses at low and medium speeds. In addition, the prospect of using synchronous valve motors with permanent magnets increases interest in this technology, as it provides increased specific power and high efficiency in a compact size [19].

Asynchronous traction motors, on the other hand, are characterized by their simple design and exceptional reliability. The absence of a commutator and a simple squirrel-cage rotor ensure high service life, low

maintenance requirements, and resistance to adverse operating conditions such as dust, moisture, shock loads, and temperature fluctuations [20]. Thanks to the development of frequency converters, vector control, and direct torque control algorithms, asynchronous motors have been able to provide traction properties that were previously only available to DC motors [21]. This has made them the primary choice in many countries when modernizing locomotive fleets and designing new high-speed and freight electric locomotives.

The comparison of valve and asynchronous motors in the context of rail transport is complex, as it includes an analysis of energy performance, dynamic properties, recuperation capabilities, power electronics reliability, operational suitability, life cycle costs, and specific applications in various types of traction electric drives. Another important factor is the impact of the motor type on the control system, traction control

functions, smooth start-up, acceleration performance, and compliance with international standards for energy efficiency and reduced operating costs [22].

Therefore, research into the characteristics of valve and asynchronous motors in railway traction rolling stock is relevant from both a scientific and practical point of view. It allows determining the optimal technical solutions for specific operating conditions, formulating recommendations on the choice of electric drive type for new and modernized locomotives and electric trains, and contributes to improving the efficiency of railway transport in general.

Analysis of recent research and publications.

The paper [23] presents a critical analysis of traction electric motors for distributed traction systems of high-speed rail transport, taking into account their design and electromagnetic characteristics. The main advantages and disadvantages of different types of motors are considered, and the limitations of structural modeling of stator elements and windings are outlined. At the same time, the study is of a review nature and does not fully take into account operating modes and dynamic loads in real operating conditions.

Review work [24] is devoted to a comparative assessment of the main types of traction motors in terms of torque density, efficiency, and economic efficiency. The limitation of the study is its focus only on generalized integral indicators without taking into account the specifics of operating modes and operating conditions.

In [25] an overview of current achievements in the field of brushless synchronous motors is presented, driven by the need to improve control methods and eliminate the shortcomings of traditional PI controllers, which, despite their simplicity, are sensitive to changes in motor parameters. To improve control efficiency, particularly taking into account current, voltage, speed, and torque ripple limitations, modern approaches are used: predictive control, slip mode control, fuzzy logic, and reinforcement learning. At the same time, the work mainly summarizes theoretical results, while the issues of experimental verification and adaptation of methods to real operating conditions remain limited.

In the work [26], an improved model of an asynchronous traction motor was developed, which takes into account the temporal change in magnetic losses in steel. The study was performed using mathematical modeling in MATLAB, the results of which determined the average values and time diagrams of magnetic losses in nominal mode with comparison to the motor's passport data. The limitation of the study is that it considers only the nominal mode without taking into account transient and non-nominal modes of operation.

Article [27] provides a comparative analysis of FOC and DTC control strategies for a permanent magnet

synchronous motor in an automotive drive based on modeling in MATLAB/Simulink. Their main advantages and disadvantages in terms of performance are evaluated, which made it possible to determine the appropriate areas of application for each method. At the same time, the results are limited by the conditions of mathematical modeling, accepted assumptions, and the lack of experimental verification on a real object.

The materials [28] provide a comprehensive overview of modern traction motor topologies for railway transport. Key aspects of their electromagnetic design, cooling systems (mainly air-cooled) and insulation systems of classes H and N are considered. A comparison of different topologies is provided, taking into account operational requirements, and their main advantages and disadvantages for different types of rolling stock are identified. The main trends in the development of traction motors are also outlined. However, the review is general in nature and is limited mainly to traditional railway applications without detailed quantitative analysis and experimental verification of the results.

The paper [29] presents the results of designing and manufacturing a basic linear asynchronous motor for traction applications. The main design concepts common to rotating electrical machines are considered; the rotor is made of aluminum sheet on an iron core, and the stator has a two-layer two-pole winding. However, the study is limited to a laboratory sample and does not cover issues of scaling and operational characteristics in real conditions.

Summarizing the above-mentioned literary sources, it can be noted that modern research in the field of brushless traction motors focuses mainly on comparative analysis of types of electric machines, improvement of control methods, and development of approaches to electromagnetic design. At the same time, most of the work is of a review or model nature and is limited to considering individual operating modes, integral efficiency indicators, or idealized operating conditions without comprehensive consideration of dynamic loads and real traction modes. The relationships between the design features of brushless traction motors, the patterns of their operating processes, and the control methods used remain insufficiently systematized. This necessitates further analysis of the designs of valve and asynchronous traction motors, the characteristics of their operating processes, methods of regulating rotation speed, and approaches to the design of asynchronous traction motors for locomotives from the perspective of ensuring high operational and energy performance.

Defining the purpose and objectives of the research.

The purpose of the article is to comprehensively evaluate and systematize the design features, regularities of working processes and control methods, as well as to formulate key principles for the design of modern high-

efficiency brushless traction motors, which will increase energy efficiency, improve traction characteristics, and ensure increased operational reliability of traction electric drives for locomotives and motor-car rolling stock. To achieve this goal, the following tasks were set:

- to analyze the design features of modern brushless traction motors;
- to identify the features of the working process of valve and asynchronous traction motors;
- to consider methods of regulating the rotation speed of asynchronous traction motors;
- to investigate the design features of asynchronous traction motors for locomotives.

The main part of the research.

Design features of modern brushless traction motors. Modern electric traction systems for rolling stock are characterized by high requirements for energy efficiency, reliability, weight and size parameters, and operational durability. The production trend of recent decades has been a transition to brushless valve (BLDC/PMSM) and asynchronous traction electric motors integrated with semiconductor converters based on IGBT/SiC modules [30, 31]. The design of motors has undergone significant changes due to the development of materials, cooling technologies, digital control systems, and optimization methods of electromagnetic modeling [32].

Compared to DC motors, both valve electric motors and asynchronous machines have a number of well-known disadvantages: rigid mechanical (speed) characteristics, increased sensitivity to power supply voltage fluctuations, and, in railway operation, even more stringent requirements for the permissible diameters of the running wheels [33]. However, these limitations can be compensated for by using static semiconductor frequency and voltage converters with the necessary feedback channels in automatic control systems [34, 35]. The use of such conversion devices makes it possible to form the speed characteristics of brushless motors in accordance with specified operating requirements. It is possible to ensure the required overload capacity ratio in terms of torque, while voltage fluctuations at the output of modern static converters, which power brushless motors, practically do not occur [36, 37]. The compounding effect is formed due to the system of interrelationships between

individual links of the converter. Increased requirements for the accuracy of rotating wheel diameters are largely eliminated by block power supply to the motors of two-axle or three-axle bogies. In addition, asynchronous electric drives are characterized by a «run-in effect» of the wheels when traction motors are powered by a single common converter [38].

This list of considerations should also include the characteristics specific to brushless motors: increased reliability (due to the absence of a commutator); lower weight and dimensions, which allows for the integration of a more powerful motor with a given diameter of the moving wheel; lower complexity of operational maintenance. Finally, due to the significantly lower rotor torque of an asynchronous motor compared to a DC motor, the dynamic impact on the gear transmission and track is reduced [39].

In traction valve motors, the most common design is a permanent magnet synchronous machine (PMSM). The electromagnetic torque is generated by the interaction of the rotor's permanent magnet field with the stator's alternating field, which is created by an inverter using FOC (Field Oriented Control) or DTC (Direct Torque Control) algorithms. This achieves a virtually linear dependence of torque on current over a wide speed range.

The rotor design determines most of the characteristics of a PMSM. Three main types are used [40, 41]:

- SPM-rotor (Surface Permanent Magnet), where magnets are installed on the surface of the rotor. The advantages are maximum flux density; the disadvantage is greater sensitivity to centrifugal loads;

- IPM-rotor (Interior Permanent Magnet), where magnets built into the rotor volume form so-called magnetic barriers. This provides increased mechanical strength, reduces the risk of demagnetization, and allows operation in field weakening modes;

- combined structures, which are a combination of surface and internal magnets to reduce harmonic components of torque.

The topologies of the PMSM rotor for high-speed drives are shown in Fig. 1.

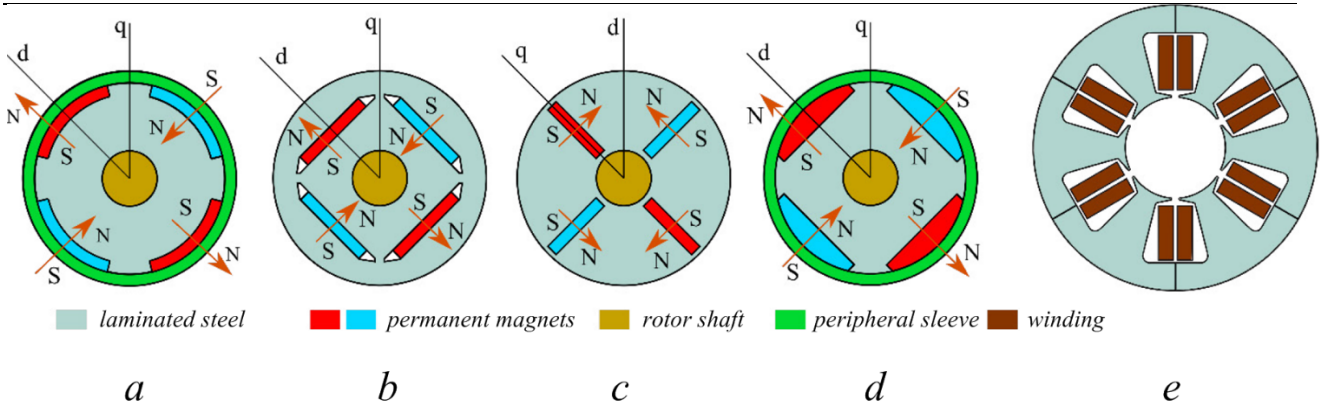


Fig. 1. PMSM rotor topologies with direct and quadrature axes marked [42]:

- a* – SPM-rotor with peripheral (external) bandage shell;
- b* – IPM-rotor with tangentially integrated permanent magnets;
- c* – IPM-rotor with radially integrated permanent magnets;
- d* – SPM-rotor with permanent magnets of the «bread loaf» type and peripheral band shell; *e* – general stator design

composites) and designs that prevent mechanical damage at high speeds [43, 44]. Table 2 shows the electrical conductivity and magnetic permeability values of common materials used in typical structural elements of high-speed permanent magnet motors, including permanent magnets, shells, and spindles.

Magnets are made of NdFeB or SmCo, using special anti-corrosion coatings (Ni-Cu-Ni, epoxy

2

General parameters of electromagnetic materials [45]

Material	Electrical conductivity σ , S/m	Relative permeability μ_r
NdFeB	$6.25 \cdot 10^5$	1.07
Sm ₂ Co ₁₇	$1.11 \cdot 10^6$	1.06
35CrMo	$3.94 \cdot 10^6$	1.0
Carbon fiber	$3.33 \cdot 10^4$	1.0
Stainless steel	$1.10 \cdot 10^6$	1.0

The motor stator is distinguished by the use of high-alloy electrical steel with a thickness of 0.2–0.3 mm to reduce eddy current losses, optimization of slot shapes to minimize torque ripple, the use of concentrated windings in high-pole designs, and improved heat dissipation thanks to longitudinal ventilation and cooling channels [46, 47].

Insulation materials belong to classes H or F, which ensures permissible operating temperatures up to 180 °C [48, 49].

Traction PMSMs typically feature cooling systems such as stator liquid cooling using a closed coolant circuit, oil splash cooling for high-load motors, and direct winding cooling in the latest designs (channels inside copper conductors) [50]. Heat dissipation

efficiency is critical because overheating can cause partial demagnetization of the rotor.

PMSM traction motors operate exclusively with converters based on IGBT (traditionally) and SiC MOSFET, which allows increasing the switching frequency and reducing the weight of passive components [51, 52]. Control systems include rotor position sensors (resolvers, optical or magnetoresistive encoders), high-speed digital controllers, torque optimization algorithms, and magnetic harmonic loss minimization algorithms.

Unlike PMSM, an asynchronous motor generates torque through electromagnetic induction in the rotor, which operates in slip mode. The torque generation mechanism determines the need for precise control of the frequency and amplitude of the power supply, which is implemented by IGBT/SiC-based inverters [53, 54].

Asynchronous traction motors with squirrel-cage rotors are practically identical in their internal structure to standard asynchronous electric motors of similar power used in general industrial installations. The rotor winding in such motors is a «birdcage» type design: aluminum, obtained by die casting, is optimal for medium-duty motors; copper with a special profile, which provides better conductivity and reduces slip losses, is used in locomotive traction. The mechanical features of the rotor of an asynchronous motor include increased thickness of the bars in areas of maximum current load, special channels and holes for internal cooling, and rigid fastening of the end rings to ensure strength at high speeds [55].

The stator is made of laminated electrical steel with slots for three-phase winding. The stator of an asynchronous motor is characterized by the use of steels with low hysteresis and eddy current losses, optimization of the shape of the slots to minimize spatial harmonics, the use of class F or H insulation, and the use of impregnation to increase the mechanical resistance of the windings to centrifugal forces and vibrations [56].

The traction motor housing, its mounting elements to the bogie frame, and the motor-axle bearings are similar in design to the corresponding components of DC or rectified current motors with similar power and voltage ratings.

Asynchronous motors have a developed cooling system: forced air cooling – for trams and electric trains; water liquid cooling of the stator – for locomotives and mainline systems; centrifugal rotary cooling, which uses the rotation of the rotor to force air through.

Asynchronous electric motors are characterized by increased sensitivity to voltage drops. Thus, when the voltage drops by 10%, the torque decreases by approximately 19 % [57, 58]. Unlike general-purpose asynchronous machines, traction asynchronous motors

have specific design features due to the peculiarities of their operation on locomotives. These features include: power supply from a frequency and phase converter, the need to place significant power in limited dimensions determined by the design of the locomotive's running gear [59].

In traction collector motors of electric locomotives with an axial ventilation system, approximately 30 % of the air flow passes through the air gap, ensuring intensive heat removal from the surfaces of the armature and poles. In traction asynchronous motors, on the contrary, in order to reduce the magnetizing current and increase the power factor $\cos\phi$, the air gap between the stator and rotor is minimized as much as possible, subject to design and technological limitations. However, axial independent ventilation does not provide effective cooling of the stator and rotor surfaces facing the air gap. In order to improve heat dissipation and increase the volume of air passing between the stator and rotor, super-pass ventilation channels are used in the design of traction asynchronous motors. About 30 % of the total cooling air flow passes through them.

The height of the slot channel is usually $(1.0...1.5) \cdot b_{ss}$, where b_{ss} denotes the width of the stator slot [60]. In valve motors, the use of super-slot channels in the stator design is impractical, as they increase the inductive resistance of the stator by approximately 40%, which causes a decrease in electromagnetic (rotational) torque. However, for asynchronous machines, such an increase in the inductive resistance of the stator is not critical, since the commutation process in them is forced.

In multipole electric machines, active materials are used more efficiently, which allows the asynchronous motor to operate with lower electrical losses and provides an increase in efficiency [61]. The characteristics of the motor and locomotive as a whole are also influenced by the nominal and maximum frequencies of the current supplying the stator winding.

There are certain design limitations associated with the use of bearings, whose maximum rotational speed is only 3000–4000 rpm. In addition, there are difficulties in implementing a traction gearbox with a high transmission ratio. The number of poles of an asynchronous traction motor also affects the level of losses in the converter [62–64]. To minimize them, it is necessary to take the frequency (speed) ratio coefficient at the level of 2.5.

From a design perspective, the advantages of an asynchronous traction motor compared to a brushless valve motor are the absence of magnets, which contributes to high reliability and thermal stability, greater resistance to overloads, lower production costs, and a simpler heat dissipation system [65].

From the point of view of traction application, both types of electric machines have specific advantages. A comparative characteristic of BLDC/PMSM and asynchronous motors is given in Table 3.

Comparative characteristics of BLDC/PMSM and asynchronous motors [66]

Parameter	BLDC/PMSM motors	Asynchronous motor
Excitation source	Permanent magnets	Induction in the rotor
Energy density	High	Medium
Efficiency coefficient, %	95–97	92–95
Reliability	Average (risk of magnet overheating)	Very high
Cost	High	Low
Recovery mode	High efficiency	Effective, but inferior
Control	Complex with sensors	Somewhat simpler
Maintenance	Minimal	Cheap and affordable

Features of the working process of valve and asynchronous traction motors.

The traction electric drive with a valve motor consists of a synchronous electric motor, a valve converter, a smoothing reactor, and a rotor position sensor. The voltage coming from the secondary winding of the transformer is converted by a thyristor converter into an alternating voltage of controlled frequency and fed to the stator windings of the synchronous motor. The motor speed and the applied voltage frequency are kept in constant correlation. The process of switching the frequency converter valves on and off is carried out strictly in accordance with the actual spatial position of the rotor; the rotor shaft is equipped with a sensor, the signals from which are sent to the thyristor control system. If the thyristor switching moment does not correspond to the actual position of the rotor, a braking moment occurs in the system. When powered by an AC mains supply, valve switching at low frequencies is provided by the mains voltage itself, and at higher frequencies by the electromotive force of the synchronous motor [67].

The specificity of the valve motor's operating process lies in the fact that the stator winding terminals are sequentially disconnected to the linear voltage of the converter. Each phase conducts current for one third of the conversion period. Provided that the winding is correctly designed, the distribution of the magnetizing force along the pole pitch of the electric machine approaches sinusoidal [68]. If the number of slots per pole and phase is equal to one, the magnetizing force of one

phase is evenly distributed over a 120° section of the stator. For phase current I_a , the amplitude of the first harmonic of the resulting magnetizing force is determined by the geometric sum of the magnetizing forces of the active phases, between whose vectors there is an angle of 60° .

This phase connection sequence generates a rotating magnetizing force in space. In a two-pole machine ($p = 1$), this magnetizing force shifts by 360° during one current period, i.e., it makes one full revolution. Since the windings are switched six times per period, the rotation of the magnetizing force is realized in the form of six steps of 60° .

The converter control system generates pulses to turn on the thyristors of the next phase every $1/6$ of a period, i.e., every 60° , as soon as the magnetic axis of the rotor shifts by the corresponding angle. In this case, the rotor axis lags behind the resulting magnetizing force of the stator by an angle $\theta = 30^\circ$.

The jump-like displacement of the magnetic field vector causes torque pulsations with a frequency six times higher than the rotation frequency [69]. In traction systems, such fluctuations usually do not affect the operation of the electric drive due to the large inertia of the masses set in motion by the traction motors. However, the discrete nature of the resulting field displacement places serious demands on the thyristor control system. The rotation speed sensor signal must also contain information about the angle θ , since the electromagnetic torque depends on it. The control pulse to the thyristor connecting the next phase should be applied at the

moment when the torque becomes less than its average value. For motors operating under stationary loads, it is not difficult to ensure the required angular alignment between the rotor and the resulting magnetic field. However, with sudden load changes, which are typical for traction electric drives, the certainty and accuracy of sensor signals are significantly reduced.

When the direction of the torque applied to the shaft changes, the valve motor automatically switches to braking mode with energy recovery without additional switching in the power circuit, i.e., to generator mode, which is permitted by the converter. At the same time, the sign of the angle θ also changes, and the rotor begins to lead the magnetic field of the stator.

When an electric machine is operating in generator mode, the activation of maximum protection leads to increased voltage on the rotor slip rings. This value may exceed the rated excitation voltage by an order of magnitude. For high-power electric motors (1500 kW and above), it is necessary to use a discharge resistor that automatically connects to the rings when the protection is activated [70].

The use of asynchronous motors with squirrel-cage rotors as traction motors is only possible if they are powered by a frequency and voltage converter equipped with appropriate feedback loops in the automatic control system of the traction electric drive [71]. This type of power supply provides the necessary traction characteristics across a wide range of motor speeds. The converter regulates the frequency and voltage level according to the specified operating mode.

The physical mechanism of electromagnetic driving force formation is generally similar to the processes in a valve motor, but differs in that the current flows through three phases simultaneously, with its value in one of the phases being twice that in the other two [72]. The change in phase currents, as in a valve motor, is abrupt in nature, which is caused by the opening and closing of the inverter valves. The distribution of the magnetizing force in the air gap becomes step-like. The graph of instantaneous phase voltage values practically repeats this shape. It should be noted that the main spatial harmonic of the magnetizing force, and therefore the induction it creates in the gap, does not move uniformly at a constant angular velocity, but makes jump-like movements at 60° intervals.

Methods for regulating the rotational speed of asynchronous traction motors. Regulating the speed of asynchronous traction motors is a key element of electric drive control in transport systems, particularly in trams, trolleybuses, electric trains, and locomotives. The rotational speed of an asynchronous motor rotor is determined by the synchronous rotational speed of the magnetic field and the slip value [73]. Therefore, effective speed control requires targeted influence on the

electromagnetic state of an electric machine by changing the frequency and amplitude of the supply voltage, as well as by optimizing energy conversion processes.

The frequency of traction electric motors varies within a very wide range – from fractions of a hertz at the initial moment of start-up, when the train begins to move from a standstill, to approximately 200 Hz when the motor reaches its maximum rotational speed, which corresponds to the maximum operating speed of the rolling stock. At low frequencies, the active resistance of the stator winding becomes comparable to its inductive resistance.

During locomotive operation, three main control zones are usually distinguished: train start-up and acceleration mode; steady power mode; high speed mode accompanied by magnetic field weakening.

During start-up, the traction electric motor must generate a torque that is 1.5 to 2 times higher than its nominal value. This result is achieved by correctly selecting the ratio between the supply voltage and frequency [74, 75]. To implement automated control of the electric drive, it is necessary to use feedback systems for rotation speed and current [76].

During acceleration, as speed increases, the power of the traction motors also increases. The maximum speed at the end of the start-up mode is determined by the endurance power of the power source. For electric locomotives, this available power is significantly greater than for diesel locomotives. With the same coupling weight of locomotives, the power of an electric locomotive that can be used to generate traction is 1.4 to 1.5 times greater than that of a diesel locomotive. This is because a diesel locomotive has more massive mechanical equipment, as it is equipped with a primary energy source – a diesel motor – and must carry the fuel supply necessary for its operation.

At low frequencies, similar to valve motors, electromagnetic torque pulsations occur in asynchronous traction electric machines. As the supply voltage frequency increases, the amplitude of these pulsations decreases. Increasing the frequency at a constant voltage causes the motor's magnetic field to weaken and the traction force to decrease.

For high-speed electric locomotives, it is possible to provide power close to the nominal value even at maximum speed. This is an important advantage of asynchronous traction motors compared to DC machines, whose power at high speeds is limited by commutation conditions in a weakened magnetic field. Only motors with compensation windings can provide approximately 80 % of continuous power at maximum speed. Asynchronous motors do not have such limitations and are usually capable of developing continuous power at

maximum speed if the converter is designed for the corresponding increased voltage level.

The most common and technically advanced method is to regulate the supply voltage frequency using semiconductor converters – frequency inverters [77]. The control law is based on maintaining a constant U/f ratio, which ensures approximately constant magnetic induction in the air gap and prevents core saturation. Frequency

control is highly efficient because it allows the synchronous rotation speed to be changed smoothly and operates over a wide speed range with minimal losses.

For traction electric drives requiring high dynamic characteristics, vector control of the rotor (Fig. 2) or stator flux linkage is used.

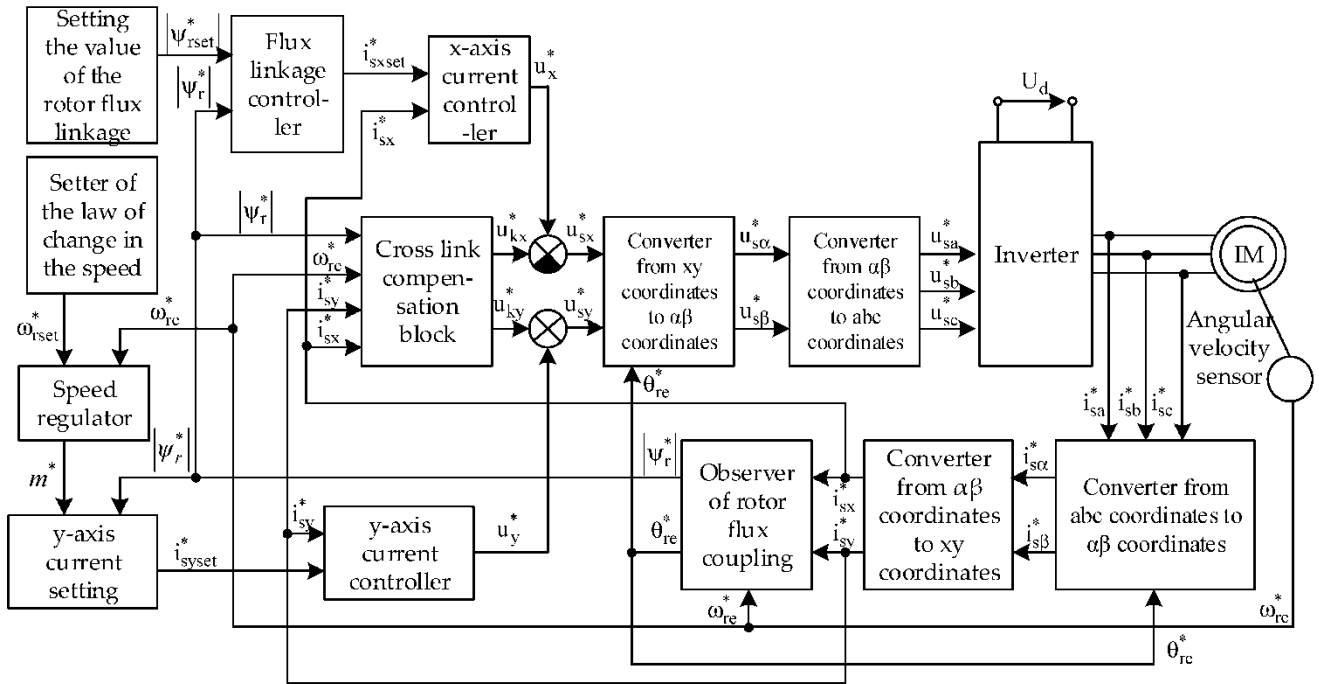


Fig. 2. Structural block diagram of the vector control system for an asynchronous electric motor [78]

This method provides independent control of the current and torque components, making the asynchronous motor equivalent to a DC motor in terms of dynamics [79, 80]. The advantages are accurate torque control, high speed, and the ability to operate at low speeds and high overloads, which is important for traction applications.

Direct torque control provides extremely fast traction motor regulation, as the algorithm directly generates torque and flux linkage based on data from current and voltage sensors. Direct torque control requires high switching frequencies and complex digital control systems, but provides minimal time delay and good resistance to parametric deviations.

Classic methods, such as changing the resistance in the rotor circuit of phase rotor motors, are rarely used

in modern traction systems due to high losses, bulky equipment, and low energy efficiency. However, historically, this method was used to gradually reduce speed and improve starting characteristics.

In traction asynchronous motors, cyclic load changes, starting and recuperative modes, as well as requirements for high starting torque at low speeds are significant [81]. Fig. 3 shows the speed and torque characteristics of an asynchronous motor, which consists of three zones: the braking zone, the movement zone, and the generation zone.

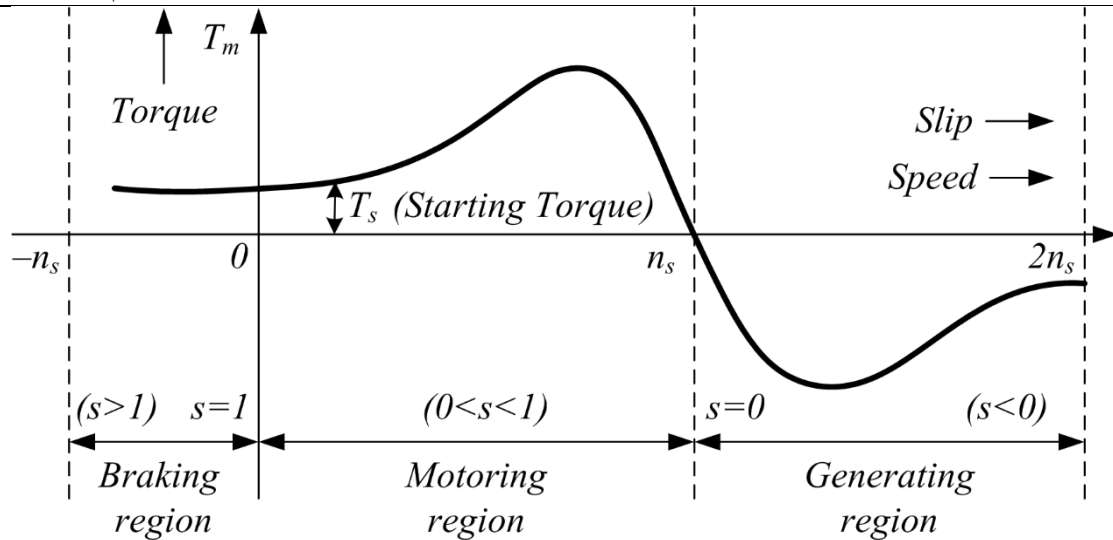


Fig. 3. Speed and torque characteristics of an asynchronous motor [82, 83]

The use of frequency and vector control makes it possible to achieve high torque across a wide frequency range, ensure smooth vehicle operation, reduce energy losses, and expand the capabilities of regenerative braking.

Features of designing asynchronous traction motors for locomotives. The design of asynchronous traction motors for locomotives is associated with the need to ensure high dynamic and energy performance in difficult operating conditions. Requirements for such electric machines include high overload capacity, reliability under prolonged mechanical and thermal loads, as well as resistance to fluctuations in traction network parameters and environmental conditions.

When designing asynchronous traction motors, the output parameters are selected in the same way as those used for DC traction motors. AC traction systems equipped with their own conversion units allow the selection of a motor voltage level that makes its design optimally light and compact, as well as improving its operating characteristics.

One of the key features of the design is the optimization of the motor's electromagnetic system, taking into account the wide range of operating frequencies and voltages provided by the traction drive converters. Since the torque of an asynchronous motor depends on slip and magnetic flux, the design of the stator and rotor magnetic circuit must minimize losses, prevent saturation, and maintain stable characteristics under variable supply frequency conditions [84].

Special attention is paid to the rotor design. For traction machines, cage rotors made of copper or highly conductive aluminum alloys are usually used, which increases efficiency and reduces slip losses in high-load

modes [85]. Eliminating the oblique arrangement of the slots reduces additional losses during operation under load. These losses must be taken into account, considering the non-sinusoidal nature of the supply voltage. To ensure high-quality casting, the minimum width of the rotor slot at its narrowest point should be 3–5 mm. For motors with a power rating of over 1000 kW, it is possible to use a rotor with a short-circuited copper winding and trapezoidal profile bars. The geometry of the rotor bars and ring elements is designed to ensure the necessary mechanical strength under the action of centrifugal forces at high speeds, as well as sufficient thermal stability during start-up and recuperative modes. After determining the rotor speed at the maximum speed of the locomotive, the required range of supply voltage regulation is set.

The stator design must combine high electromagnetic efficiency with the ability to dissipate heat intensively. When selecting the number of pole pairs in the stator winding, the conditions for reliable operation of semiconductor converters at limit frequencies must be taken into account. Several typical configurations are usually considered to assess their impact on motor performance. A larger number of poles is typically characteristic of high-power motors. Reducing the number of poles causes a decrease in the output voltage frequency, which, in turn, allows for a reduction in the weight of the converter. At the same time, this design solution leads to an increase in the length of the stator winding end pieces, which causes an increase in the overall length of the electric machine. In addition, the height of the stator back increases due to the increase in magnetic flux, which causes an increase in the outer diameter of the stator. The outer diameter of the traction motor frame is limited by the dimensions of the rolling stock and the size of the center. The maximum permissible length of the stator package is mainly

determined by the number of poles and the diameter of the stator's inner cavity.

Traction motors use a reinforced insulation system, the front parts of the windings are fixed with mechanically stable elements, and the ventilation system – forced or combined – is designed taking into account the dustiness and humidity of the environment. When insulating the stator windings, insulation materials belonging to thermal classes F and H should be used [86, 87].

Engineering requirements also include optimizing weight and size parameters and ensuring ease of maintenance. The motor must have a compact design that allows it to be integrated into the locomotive's bogie area and guarantees access to components for repair [88]. The desire to reduce the size and weight of the motor leads to a tendency to increase the supply voltage frequency. In addition, it is important to ensure the motor's resistance to vibration loads and shock impacts characteristic of railway transport.

Strict requirements for mass and dimensional characteristics, effective cooling, and the use of high-quality steels and high-class insulating materials allow for increased electromagnetic loads [89]. To achieve the required starting torque and high overload capacity, the stator slots must be open [90]. The most optimal design solution for stator windings, which should be strived for, is a two-layer winding with two conductors per slot. This completely eliminates the possibility of coil short circuits and ensures maximum reliability of the stator winding [91]. However, due to the limitations imposed by calculations, it is not always possible to implement such a design.

Modern control systems for asynchronous traction motors based on vector control influence design features, as they allow flexible changes to the operating parameters of the electric machine, optimizing the magnetic flux and currents depending on the operating mode [92]. This requires accurate calculation of the parameters of the equivalent motor circuit and coordination of the characteristics with the capabilities of the power converter.

The designed electric motor must be tested for stability against overturning in various operating modes. Thus, in the starting mode, it is necessary to ensure a stability reserve at maximum torque sufficient to prevent overturning. The calculation of traction asynchronous electric motors is generally similar to the calculation of conventional asynchronous machines. To obtain the required operating characteristics, this calculation is performed for different values of voltage and supply frequency.

The integration of asynchronous traction motors for locomotives with power electronics into single electromechanical modules is one of the key trends in the development of modern traction electric drives for rail transport. This approach involves the constructive and functional integration of an electric machine with semiconductor frequency converters, control systems, and auxiliary units into a compact module with a single cooling system and electromechanical interfaces. This makes it possible to significantly reduce the length of power connections, reduce parasitic inductance and energy losses, and improve the electromagnetic compatibility of the traction electric drive.

The use of modular architecture helps to increase the specific power and reliability of the traction motor by optimizing the thermal conditions of both the windings of the electric machine and the power semiconductor elements. The joint design of the motor and converter allows for the coordination of winding parameters, power supply frequency range, and control algorithms, which reduces electromagnetic torque ripple, improves dynamic characteristics, and reduces acoustic noise. In addition, integration facilitates the implementation of modern vector and predictive control methods aimed at improving energy efficiency and adapting to changing operating conditions (Table 4).

4

Advantages and disadvantages of different traction drive control methods [93, 94]

Control method	Advantages	Disadvantages
Scalar	<ul style="list-style-type: none"> – simple design; – affordability 	<ul style="list-style-type: none"> – ineffective dynamic response; – low torque control; – inaccurate control

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Vector	FOC	
	<ul style="list-style-type: none"> – effective dynamic characteristics; – ability to achieve full torque at zero speed; – fixed switching frequency 	<ul style="list-style-type: none"> – need for feedback; – cost; – compared to DTC and MPC, it reacts more slowly; – requires an external modulator, which is more complex
	DTC	
	<ul style="list-style-type: none"> – extremely fast dynamic response; – non-sensory; – lightweight construction; – low processing time 	<ul style="list-style-type: none"> – high torque and current ripple compared to FOC; – oscillating switching frequency; – very difficult to regulate at low speeds; – greater sensitivity to motor characteristics
Predictive	<ul style="list-style-type: none"> – cost-effective and improved energy savings; – improved transient response; – prediction of future control actions and time savings during the calculation process 	<ul style="list-style-type: none"> – requires determination of the appropriate system model; – installation costs may be high
Touchless	<ul style="list-style-type: none"> – better noise immunity; – less complex hardware and higher durability; – low maintenance requirements 	<ul style="list-style-type: none"> – high installation cost

Another important advantage is the simplification of installation, maintenance, and standardization of traction electric drives for different types of locomotives. Uniform electromechanical modules create the conditions for a transition to plug-and-play concepts in locomotive construction, which reduces rolling stock downtime and overall operating costs. At the same time, the implementation of this approach requires solving complex problems of thermomechanical compatibility, vibration resistance, and electrical insulation, which determines the relevance of further scientific research in this field.

Thus, the design of asynchronous traction motors for locomotives is a complex process that combines electromagnetic, mechanical, thermal, and operational aspects. Competent integration of these factors ensures high efficiency of the traction electric drive, reliability in difficult operating conditions, and reduced operating costs.

Conclusions.

Based on the research conducted, the following conclusions can be drawn:

- modern brushless traction motors demonstrate significant progress in design due to the absence of a commutator-brush assembly, which reduces losses and ensures high reliability in heavy-duty locomotive operation. The use of permanent magnets increases specific power and efficiency, while optimized stators and cooling systems allow operation with high currents and torques. Designs are focused on reducing weight, improving heat dissipation, and integrating with converters, making brushless motors promising for modern transportation;

- the operating processes of valve and asynchronous traction motors have fundamental differences that determine their performance characteristics. In valve machines, torque is generated by electronic commutation and precise control of phase

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

currents, which ensures high efficiency and stable traction. In asynchronous motors, the processes are determined by the slip and interaction of the rotor with the rotating magnetic field, which allows them to operate efficiently over a wide range of loads. Both types have advantages, but differ in dynamics and sensitivity to mode changes;

– the speed control of asynchronous traction motors is based on the use of frequency converters that change the ratio of voltage and supply frequency. Scalar control is easy to implement but has limited dynamics. Vector methods allow precise control of flux linkage and torque, maintaining efficiency in traction and braking modes. This allows asynchronous motors to operate under conditions of sudden load changes and provides optimal energy performance for locomotives;

– the design of asynchronous traction motors for locomotives requires consideration of increased mechanical and thermal loads, which necessitates optimization of the magnetic circuit, rotor, and ventilation system. Designers are focusing on increasing the strength of the cage rotor, using special alloys, and improving insulation materials. It is also important to ensure effective integration of the motor with the converter and adaptation to different traction modes. Modern approaches are aimed at improving reliability, efficiency, and durability in the harsh conditions of locomotive operation.

Reference

1. Нерубацький В. П. Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. *Збірник матеріалів XI міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2025»* (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 18–20 листопада 2025 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.
2. Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу з перетворювачем частоти. *Тези III Міжнар. наук.-практ. конф. «Рухомий склад нового покоління: із XX в XXI сторіччя»* (Харків, УкрДУЗТ, 22–23 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 81–83.
3. Нерубацький В. П., Плахтій О. А. Підвищення енергоефективності рухомого складу з асинхронним електроприводом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–25 жовтня 2019 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 4 (додаток). С. 11–13.
4. Нерубацький В. П., Фалєєв Ф. Р., Огурцов С. С. Засоби енергозбереження при експлуатації високошвидкісного залізничного транспорту. *Матеріали IX всеукр. наук.-практ. інтернет-конфе. студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики»* (Херсон, ХНТУ, 22 травня 2025 р.). Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2025. С. 165–167.
5. Gubarevych O., Duer S., Melkonova I., Woźniak M., Paś J., Stawowy M., Rokosz K., Zajkowski K., Bernatowicz D. Research on and assessment of the reliability of railway transport systems with induction motors. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 19. 6888. <https://doi.org/10.3390/en16196888>.
6. Bodnar B., Ochkasov O., Hryshechkina T., Petrenko V. A case study of the use of statistical processing of the armature rotation irregularities for the diagnostics of locomotive traction electric motors. *Transport*. 2025. Vol. 40, Iss. 1. P. 24–34. <https://doi.org/10.3846/transport.2025.23229>.
7. Нерубацький В. П. Аналіз експлуатаційної надійності безколекторних тягових двигунів локомотивів. *Тези 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Прогресивні технології засобів транспорту»* (Харків, УкрДУЗТ, 03–04 грудня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 11–13.
8. Босак П. В., Лук'янчук Н. Г., Попович В. В. Чинники впливу залізничного транспорту на екологічну безпеку довкілля. *Екологічні науки*. 2022. № 3 (42). С. 205–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.34>.
9. Нерубацький В. П., Фалєєв Ф. Р. Реалізація розвитку залізничного транспорту з дотриманням екологічних вимог. *Матеріали наук.-практ. конф. «Наука XXI століття. Інновації у транспортній галузі»* в рамках VII Фестивалю науки (Харків, ХДНБ імені В. Г. Короленка, 12 травня 2025 р.). Харків: ХДНБ імені В. Г. Короленка, 2025. С. 86–89.
10. Нерубацький В. П., Фалєєв Ф. Р., Шаповалова Д. С. Аналіз впливу автомобільного та залізничного транспорту на стан атмосферного повітря. *Збірник матеріалів X Міжнародного молодіжного конгресу «Сталій розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* (Львів, НУЛП, 27–28

- березня 2025 р.). Київ: Яро́ченко Я. В., 2025. С. 39.
11. Нерубацький В. П. Ініціювання реалізації прикладного дослідницького проекту з удосконалення енергоефективності тягових електричних двигунів локомотивів з урахуванням режимів функціонування тягових перетворювачів. *Збірка наукових тез XIV наук. конф. «Наукові підсумки 2025 року»* (Харків, 18 грудня 2025 р.). Харків: ПП «Технологічний Центр», 2025. С. 29.
 12. Нерубацький В. П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення. *Тези доповідей 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 81–83.
 13. Polater N., Tricoli P. Technical review of traction drive systems for light railways. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 9. 3187. <https://doi.org/10.3390/en15093187>.
 14. Lienau W., Muller-Hellmann A., Skudelny H.-C. Power converters for feeding asynchronous traction motors of single-phase AC vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1980. Vol. IA-16, Iss. 1. P. 103–110. <https://doi.org/10.1109/TIA.1980.4503755>.
 15. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph. Kharkiv: Publisher Machulin L., 2023. 220 p.
 16. Аргун І. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*. Вип. 43. С. 36–46. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36>.
 17. Jin C.-S., Kim C.-M., Kim I.-J., Jang I. Proposed commutation method for performance improvement of brushless DC motor. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. 6023. <https://doi.org/10.3390/en14196023>.
 18. Зінченко О. Є. Вентильні реактивні двигуни. Сучасний стан і перспективні напрями досліджень. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 157. С. 164–168. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.157.2015.61997>.
 19. Zhang G., Guo X., Zhou J., Hua W. Review on the development and applications of permanent magnet Vernier motors. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 9. 2353. <https://doi.org/10.3390/en18092353>.
 20. Nerubatskyi V. P. Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. *Матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Людина, суспільство, комунікативні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24 жовтня 2025 р.). Дніпро: Середняк Т. К., 2025. С. 217–219.
 21. Fathy Abouzeid A., Guerrero J. M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 3. 700. <https://doi.org/10.3390/en13030700>.
 22. Дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2022. Вип. 202. С. 62–77. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273622>.
 23. Paul S., Han P.-W., Chang J., Chun Y.-D., Lee J.-G. State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 14623–14642. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.411>.
 24. Shahakar D. A., Shahakar Y. D. Review of traction motors for electric vehicle application. *EPJ Web of Conferences*. 2025. Vol. 341. 01019. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202534101019>.
 25. Mashiri T., Muteba M. A review of advances in brushless synchronous motor drive's control techniques. *Eng*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. 8. <https://doi.org/10.3390/eng6010008>.
 26. Goolak S., Riabov I., Gorobchenko O., Yurchenko V., Nezlina O. Improvement of the model of an asynchronous traction motor of an electric locomotive by taking into account power losses. *Przeгляд Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98, No. 5. P. 1–10. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.01>.
 27. Simon M. G., Fodor D. Comparative analysis of field oriented control and direct torque control through simulation in MATLAB Simulink for an automotive drive motor. *Engineering Proceedings*. 2024. Vol. 79, Iss. 1. 33. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079033>.
 28. Nategh S., Boglietti A., Liu Y., Barber D., Brammer R., Lindberg D. A review on different aspects of traction motor design for railway

- applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56, Iss. 3. P. 2148–2157. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2968414>.
29. Nireekshana T., Ramesh Babu V. Design and fabrication of linear induction motor for traction application. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2017. Vol. 6, Iss. 6. P. 1–18.
30. Аналіз енергетичних процесів у семирівневому автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Н. П. Карпенко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Т. 24, № 5. С. 8–18. <https://doi.org/10.18664/iksz.v24i5.181286>.
31. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Khomenko I., Tsybulnyk V., Syniavskiy A. Comprehensive study of cascade multilevel inverters with three level cells. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) Proceedings*. 2020. P. 277–282. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160258>.
32. Gronwald P.-O., Kern T. A. Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. Vol. 7, Iss. 4. P. 2892–2913. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3075844>.
33. Процедура вибору асинхронного тягового електроприводу для інноваційного рухомого складу метрополітену / А. Сулим, О. Устенко, О. Мельник та ін. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2021. Вип. 37. С. 97–118. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11>.
34. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>.
35. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225327>.
36. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Tsybulnyk V. R. Analysis of the energy efficiency of a two-level voltage source inverter in the overmodulation mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No. 4 (172). P. 68–72. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/9>.
37. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз енергоефективності трирівневих автономних інверторів напруги в режимі перемодуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 4. С. 3–12. <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i4.177089>.
38. Perez-Pinal F. J., Nunez C., Alvarez R. Multi-motor synchronization technique applied in traction devices. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*. 2005. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195925>.
39. Zhang K., Yang J., Liu C., Wang J., Yao D. Dynamic characteristics of a traction drive system in high-speed train based on electromechanical coupling modeling under variable conditions. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 3. 1202. <https://doi.org/10.3390/en15031202>.
40. Sayed E., Yang Y., Bilgin B., Bakr M. H., Emadi A. A comprehensive review of flux barriers in interior permanent magnet synchronous machines. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 149168–149181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947047>.
41. Du G., Li N., Zhou Q., Gao W., Wang L., Pu T. Multi-physics comparison of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor for high-speed applications. *Machines*. 2022. Vol. 10, Iss. 8. 700. <https://doi.org/10.3390/machines10080700>.
42. Kovacik M., Rafajdus P., Kocan S. Comparison of various PMSM rotor topologies for high-speed drives in automotive applications. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 995–1002. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.070>.
43. Tomšė T., Kubelka P., Moreno López R., Fleissner P., Grau L., Zaplotnik M., Burkhardt C. Magnetic performance and anticorrosion coating stability of thermally demagnetized Nd-Fe-B permanent magnets for reuse applications. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 23. 5927. <https://doi.org/10.3390/ma17235927>.
44. Rampin I., Bisaglia F., Dabalà M. Corrosion properties of NdFeB magnets coated by a Ni/Cu/Ni layer in chloride and sulfide environments. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010. Vol. 19. P. 970–975. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9568-6>.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

45. Li Z., Che S., Zhao H., Zhang L., Wang P., Du S., Zhang H., Feng Y., Sun H. Loss analysis of high-speed permanent magnet motor based on energy saving and emission reduction. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 2379–2394. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.053>.
46. Millinger J., Wallmark O., Soulard J. High-frequency characterization of losses in fully assembled stators of slotless PM motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. Vol. 54, Iss. 3. P. 2265–2275. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2806883>.
47. Tian Y., Liang S., Wang F., Tian J., Chen K., Liu S. Analysis of rotor lamination sleeve loss in high-speed permanent magnet synchronous motor. *Machines*. 2025. Vol. 13, Iss. 3. 236. <https://doi.org/10.3390/machines13030236>.
48. Papkov A. V., Berezinets N. I., Kireev A. V., Pak V. M. Longevity tests of class-H insulation systems (180 °C) in locomotive traction motors. *R. Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82. P. 189–191. <https://doi.org/10.3103/S1068371211040134>.
49. Nategh S., Barber D., Lindberg D., Boglietti A., Aglen O. Review and trends in traction motor design: Primary and secondary insulation systems. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506858>.
50. Tang Y., Sun S., Yu W., Hua W. Thermal analysis of water-cooling permanent magnet synchronous machine for port traction electric vehicle. *Electronics*. 2023. Vol. 12, Iss. 3. 734. <https://doi.org/10.3390/electronics12030734>.
51. Poolphaka P., Jamshidpour E., Lubin T., Baghli L., Takorabet N. Influence of high-frequency operation on the efficiency of a PMSM drive with SiC-MOSFET inverter. *Energies*. 2024. Vol. 17, Iss. 10. 2347. <https://doi.org/10.3390/en17102347>.
52. Ryu J.-H., Lee J.-H., Lee J.-S. Switching frequency determination of SiC-inverter for high efficiency propulsion system of railway vehicle. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 19. 5035. <https://doi.org/10.3390/en13195035>.
53. Cai W., Wu X., Zhou M., Liang Y., Wang Y. Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles. *Automotive Innovation*. 2021. Vol. 4. P. 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z>.
54. Ding X., Du M., Zhou T., Guo H., Zhang C. Comprehensive comparison between silicon carbide MOSFETs and silicon IGBTs based traction systems for electric vehicles. *Applied Energy*. 2017. Vol. 194. P. 626–634. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.059>.
55. Barta J., Uzhegov N., Losak P., Ondrusek C., Mach M., Pyrhönen J. Squirrel-cage rotor design and manufacturing for high-speed applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, Iss. 9. P. 6768–6778. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2879285>.
56. Azab M. A review of recent trends in high-efficiency induction motor drives. *Vehicles*. 2025. Vol. 7, Iss. 1. 15. <https://doi.org/10.3390/vehicles7010015>.
57. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Jr., Umans S. D. Electric machinery. 6th ed. USA, NY: McGraw-Hill, 2003. 688 p.
58. Lee C.-Y., Chen B.-K., Lee W.-J., Hsu Y.-F. Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. *Electric Power Systems Research*. 1998. Vol. 47, Iss. 3. P. 153–163. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00035-2).
59. Masuku T. M.; Wang R.-J., Botha M. C., Gerber S. Design strategy of traction induction motors. *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704761>.
60. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. Design of rotating electrical machines. *John Wiley & Sons, Ltd*. 2013. 616 p. <https://doi.org/10.1002/9781118701591>.
61. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H. A., Williamson S. Multiphase induction motor drives – a technology status review. *IET Electric Power Applications*. 2007. Vol. 1, Iss. 4. P. 489–516. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060342>.
62. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Сушко Д. Л., Кавун В. Є. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквadrантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.088>.
63. Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко та

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 22–35.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312>.
64. Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, В. В. Івахно та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 2. С. 33–44.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307651>.
65. Gobbi M., Sattar A., Palazzetti R., Mastinu G. Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review. *Applied Energy*. 2024. Vol. 357. 122496.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>.
66. Rauth S. S., Samanta B. Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-based FOC. *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*. 2020.
<https://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>.
67. Steigerwald R. L., Lipo T. A. Analysis of a novel forced-commutation starting scheme for a load-commutated synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1979. Vol. IA-15, Iss. 1. P. 14–24.
<https://doi.org/10.1109/TIA.1979.4503608>.
68. Frikha M. A., Croonen J., Deepak K., Benômar Y., El Baghdadi M., Hegazy O. Multiphase motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 2. 768.
<https://doi.org/10.3390/en16020768>.
69. Martinez M., Fernandez D., Reigosa D., Guerrero J. M., Briz F. Wireless torque pulsations measurement system for PMSMs. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2018.
<https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557564>.
70. Rebollo E., Platero C. A., Talavera D., Granizo R. Use of discharge resistor to improve transient de-excitation in brushless synchronous machines. *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 13. 2528.
<https://doi.org/10.3390/en12132528>.
71. Rigatos G., Siano P., Wira P., Profumo F. Nonlinear H-infinity feedback control for asynchronous motors of electric trains. *Intelligent Industrial Systems*. 2015. Vol. 1. P. 85–98.
<https://doi.org/10.1007/s40903-015-0020-y>.
72. Babu P. S. Harmonic analysis of inverter-fed induction motor drive system under fault conditions using FFT. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9 (S1). P. 1–6.
<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9iS1/108359>.
73. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.
74. Youssef O. E. M., Shaltout A. Starting of loaded induction motors using proposed Volts/Hertz control scheme. *17th International Middle East Power Systems Conference*. 2015. P. 1–6.
75. Travieso-Torres J. C., Duarte-Mermoud M. A., Díaz M., Contreras-Jara C., Hernández F. Closed-loop adaptive high-starting torque scalar control scheme for induction motor variable speed drives. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 10. 3489.
<https://doi.org/10.3390/en15103489>.
76. Mencou S., Yakhlef M. B., Tazi E. B. Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 14. 101098.
<https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101098>.
77. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги: монографія. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 248 с.
78. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Kilikevičius S. Analysis of the efficiency of traction drive control systems of electric locomotives with asynchronous traction motors. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 9. 3689.
<https://doi.org/10.3390/en16093689>.
79. Santisteban J. A., Stephan R. M. Vector control methods for induction machines: An overview. *IFAC Proceedings Volumes*. 1995. Vol. 28, Iss. 18. P. 147–151.
80. Struharňanský E., Vittek J., Makyš P., Ilončíak J. Vector control techniques for traction drive with induction machines – comparison. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 851–856.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.147>.
81. Nerubatskyi V. P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 4. С. 3–21.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.

82. Agrawal A., Lodhi R. S., Nema P. A review of speed control methods of induction motor. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2018. Vol. 13, Iss. 3. P. 9–14. <https://doi.org/10.9790/1676-1303020914>.
83. Sehgal V., Rao C. Review on speed control methods of induction motor. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2022. Vol. 9, Iss. 11. P. 829–836.
84. Monjo L., Córcoles F., Pedra J. Saturation effects on torque- and current-slip curves of squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013. Vol. 28, Iss. 1. P. 243–254. <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2232672>.
85. Kondo M., Ebizuka R., Yasunaga A. Rotor design for high efficiency induction motors for railway vehicle traction. *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2009. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382961>.
86. Barré O., Napame B. The insulation for machines having a high lifespan expectancy, design, tests and acceptance criteria issues. *Machines*. 2017. Vol. 5, Iss. 1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/machines5010007>.
87. Hordiienko A., Iegorov O., Potryvaieva N. Heat resistance class selection for the stator winding insulation in the circulation pumps induction motors. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402481>.
88. Liu Y., Chen Z., Li W., Wang K. Dynamic analysis of traction motor in a locomotive considering surface waviness on races of a motor bearing. *Railway Engineering Science*. 2021. Vol. 29. P. 379–393. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00246-x>.
89. Nategh S., Lindberg D., Brammer R., Boglietti A., Aglen O. Review and trends in traction motor design: Electromagnetic and cooling system layouts. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506817>.
90. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012040>.
91. Yapele D., Youmssi A., Boussaibo A., Guidkaya G., Kamgang J. Comparative analysis of single-layer and double-layer windings in three-phase squirrel-cage induction machines using FEA and d-q modelling. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2025. Vol. 17, No. 2. P. 15–45. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2025.172002>.
92. Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2025. Вип. 214. С. 181–200.
93. Sambhavi Y. V., Ramachandran V. A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy Reports*. 2023. Vol. 10. P. 3882–3907. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.056>.
94. Poorfakhraei A., Narimani M., Emadi A. A review of modulation and control techniques for multilevel inverters in traction applications. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 24187–24204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056612>.

Список використаних джерел

1. **Nerubatskyi, V. P. (2025)**. Ohliad tekhnolohichnykh rishen pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty bezkolektornykh tiahovykh dvyhuniv lokomotyviv [Review of technological solutions to improve the energy efficiency of brushless traction motors of locomotives]. In *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Energy Management: State and Development Prospects – PEMS'2025"* (pp. 118–119). NTU "KPI". [in Ukrainian].
2. **Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2023)**. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti asynkronnoho elektropryvodu z peretvoriuvachem chastoty [Improving the energy efficiency of an asynchronous electric drive with a frequency converter]. In *Abstracts of the III International Scientific and Practical Conference "Rolling Stock of the New Generation: From the XX to the XXI Century"* (pp. 81–83). UkrSURT. [in Ukrainian].
3. **Nerubatskyi, V. P., & Plakhtii, O. A. (2019)**. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti rukhomoho skladu z asynkronnym elektropryvodom [Improving the energy efficiency of rolling stock with an asynchronous electric drive]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4, Suppl.), 11–13. [in Ukrainian].

4. **Nerubatskyi, V. P., Faliiev, F. R., & Ohurtsov, S. S. (2025).** Zasoby enerhozberezhennia pry ekspluatatsii vysokoshvydkisnoho zaliznychnoho transportu [Energy-saving tools in the operation of high-speed railway transport]. In *Materials of the IX All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Actual Problems of Modern Energy"* (pp. 165–167). Vyshemyrskyi V. S. [in Ukrainian].
5. **Gubarevych, O., Duer, S., Melkonova, I., Woźniak, M., Paś, J., Stawowy, M., Rokosz, K., Zajkowski, K., & Bernatowicz, D. (2023).** Research on and assessment of the reliability of railway transport systems with induction motors. *Energies*, 16(19), 6888. <https://doi.org/10.3390/en16196888>
6. **Bodnar, B., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Petrenko, V. (2025).** A case study of the use of statistical processing of the armature rotation irregularities for the diagnostics of locomotive traction electric motors. *Transport*, 40(1), 24–34. <https://doi.org/10.3846/transport.2025.23229>
7. **Nerubatskyi, V. P. (2025).** Analiz ekspluatatsiinoi nadiinosti bezkolekturnykh tiahovykh dvyhuniv lokomotyviv [Analysis of operational reliability of brushless traction motors of locomotives]. In *Abstracts of the 3rd International Scientific and Technical Conference "Progressive Technologies of Transport Means"* (pp. 11–13). UkrSURT. [in Ukrainian].
8. **Bosak, P. V., Lukianchuk, N. H., & Popovych, V. V. (2022).** Chynnyky vplyvu zaliznychnoho transportu na ekolohichnu bezpeku dovkillia [Factors of influence of railway transport on environmental safety]. *Ekolohichni nauky*, (3(42)), 205–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.34> [in Ukrainian].
9. **Nerubatskyi, V. P., & Faliiev, F. R. (2025).** Realizatsiia rozvytku zaliznychnoho transportu z dotrymanniam ekolohichnykh vymoh [Implementation of railway transport development in compliance with environmental requirements]. In *Proceedings of the Conference "Science of the XXI Century. Innovations in the Transport Sector"* (pp. 86–89). Korolenko KhDNB. [in Ukrainian].
10. **Nerubatskyi, V. P., Faliiev, F. R., & Shapovalova, D. S. (2025).** Analiz vplyvu avtomobilnoho ta zaliznychnoho transportu na stan atmosferneho povitria [Analysis of the influence of road and rail transport on the state of atmospheric air]. In *Materials of the X International Youth Congress "Sustainable Development: Environmental Protection. Energy Saving"* (p. 39). Yarochenko Ya. V. [in Ukrainian].
11. **Nerubatskyi, V. P. (2025).** Initsiiuvannia realizatsii prykladnoho doslidnytskoho proiektu z udoskonalennia enerhoefektyvnosti tiahovykh elektrychnykh dvyhuniv lokomotyviv [Initiating the implementation of an applied research project to improve the energy efficiency of traction electric motors of locomotives]. In *Abstracts of the XIV Scientific Conference "Scientific Results of 2025"* (p. 29). Technology Center. [in Ukrainian].
12. **Nerubatskyi, V. P. (2025).** Monitorynh tekhnichnoho stanu bezkolekturnykh tiahovykh dvyhuniv zavdiaky zaluchenniu tsyfrovyykh tekhnolohii sohodennia [Monitoring the technical condition of brushless traction motors through the involvement of modern digital technologies]. In *Abstracts of the 6th International Scientific and Technical Conference "Intelligent Transport Technologies"* (pp. 81–83). UkrSURT. [in Ukrainian].
13. **Polater, N., & Tricoli, P. (2022).** Technical review of traction drive systems for light railways. *Energies*, 15(9), 3187. <https://doi.org/10.3390/en15093187>
14. **Lienau, W., Muller-Hellmann, A., & Skudelny, H.-C. (1980).** Power converters for feeding asynchronous traction motors of single-phase AC vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-16(1), 103–110. <https://doi.org/10.1109/TIA.1980.4503755>
15. **Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., & Hordiienko, D. A. (2023).** *Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph*. Publisher Machulin L.
16. **Arhun, Sh. V. (2018).** Rozrakhunok osnovnykh kharakterystyk tiahovoho asynkhronnoho dvyhuna dlia elektrychnoi transmisi miskoho elektrobusa [Calculation of the main characteristics of a traction induction motor for the electric transmission of an urban electric bus]. *Avtomobilnyi transport*, (43), 36–46. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36> [in Ukrainian].
17. **Jin, C.-S., Kim, C.-M., Kim, I.-J., & Jang, I. (2021).** Proposed commutation method for performance improvement of brushless DC motor. *Energies*, 14(19), 6023. <https://doi.org/10.3390/en14196023>
18. **Zinchenko, O. Ye. (2015).** Ventilni reaktyvni dvyhuny. Suchasnyi stan i perspektyvni napriamy doslidzhen [Switched reluctance motors. Current state and promising research directions]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrSURT*, (157), 164–168. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.157.2015.61997> [in Ukrainian].
19. **Zhang, G., Guo, X., Zhou, J., & Hua, W. (2025).** Review on the development and applications of permanent magnet Vernier motors. *Energies*, 18(9), 2353. <https://doi.org/10.3390/en18092353>
20. **Nerubatskyi, V. P. (2025).** Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. In *Materials of the XIII International Scientific and Practical*

- Conference "Man, Society, Communication Technologies" (pp. 217–219). Seredniak T. K.
21. Fathy Abouzeid, A., Guerrero, J. M., Endemaño, A., Muniategui, I., Ortega, D., Larrazabal, I., & Briz, F. (2020). Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*, 13(3), 700. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
 22. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., et al. (2022). Doslidzhennia systemy keruvannia prystroiu plavnoho pusku asynkronnoho dvyhuna [Research on the control system of the soft starter of an asynchronous motor]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrSURT*, (202), 62–77. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273622> [in Ukrainian].
 23. Paul, S., Han, P.-W., Chang, J., & Chun, Y.-D. (2022). State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. *Energy Reports*, 8, 14623–14642. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411>
 24. Shahakar, D. A., & Shahakar, Y. D. (2025). Review of traction motors for electric vehicle application. *EPJ Web of Conferences*, 341, 01019. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202534101019>
 25. Mashiri, T., & Muteba, M. (2025). A review of advances in brushless synchronous motor drive's control techniques. *Eng*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/eng6010008>
 26. Goolak, S., Riabov, I., Gorobchenko, O., Yurchenko, V., & Nezlina, O. (2022). Improvement of the model of an asynchronous traction motor of an electric locomotive by taking into account power losses. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(5), 1–10. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.01>
 27. Simon, M. G., & Fodor, D. (2024). Comparative analysis of field oriented control and direct torque control through simulation in MATLAB Simulink for an automotive drive motor. *Engineering Proceedings*, 79(1), 33. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079033>
 28. Nategh, S., Boglietti, A., Liu, Y., Barber, D., Brammer, R., & Lindberg, D. (2020). A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2148–2157. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2968414>
 29. Nireekshana, T., & Ramesh Babu, V. (2017). Design and fabrication of linear induction motor for traction application. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 6(6), 1–18.
 30. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Karpenko, N. P., et al. (2019). Analiz enerhetychnykh protsesiv u semyrivnevomu avtonomnomu invertori napruhy pry riznykh alhorytmakh moduliatsii [Analysis of energy processes in a seven-level autonomous voltage inverter with different modulation algorithms]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 24(5), 8–18. <https://doi.org/10.18664/iksz.v24i5.181286> [in Ukrainian].
 31. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Khomenko, I., Tsybulnyk, V., & Syniavskiy, A. (2020). Comprehensive study of cascade multilevel inverters with three level cells. In *Proceedings of the 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 277–282). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160258>
 32. Gronwald, P.-O., & Kern, T. A. (2021). Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4), 2892–2913. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3075844>
 33. Sulym, A., Ustenko, O., Melnyk, O., et al. (2021). Protsedura vyboru asynkronnoho tiahovoho elektropryvodu dlia innovatsiinoho rukhomoho skladu metropolitenu [Procedure for choosing an asynchronous traction electric drive for innovative rolling stock of the subway]. *Transportni systemy i tekhnologii*, (37), 97–118. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11> [in Ukrainian].
 34. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Tugay, D. V., & Hordiienko, D. A. (2021). Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 103–110. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>
 35. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Hordiienko, D., Mykhalkiv, S., & Ravlyuk, V. (2021). A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8(109)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225327>
 36. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2019). Analysis of the energy efficiency of a two-level voltage source inverter in the overmodulation mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 68–72. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/9>
 37. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2019). Analiz enerhoefektyvnosti tryrivnyvykh avtonomnykh invertoriv napruhy v rezhymy peremoduliatsii [Analysis of the energy efficiency of three-level autonomous voltage inverters in the overmodulation mode]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 3–12. <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i4.177089> [in Ukrainian].

38. Perez-Pinal, F. J., Nunez, C., & Alvarez, R. (2005). Multi-motor synchronization technique applied in traction devices. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195925>
39. Zhang, K., Yang, J., Liu, C., Wang, J., & Yao, D. (2022). Dynamic characteristics of a traction drive system in high-speed train based on electromechanical coupling modeling under variable conditions. *Energies*, 15(3), 1202. <https://doi.org/10.3390/en15031202>
40. Sayed, E., Yang, Y., Bilgin, B., Bakr, M. H., & Emadi, A. (2019). A comprehensive review of flux barriers in interior permanent magnet synchronous machines. *IEEE Access*, 7, 149168–149181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947047>
41. Du, G., Li, N., Zhou, Q., Gao, W., Wang, L., & Pu, T. (2022). Multi-physics comparison of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor for high-speed applications. *Machines*, 10(8), 700. <https://doi.org/10.3390/machines10080700>
42. Kovacic, M., Rafajdus, P., & Kocan, S. (2021). Comparison of various PMSM rotor topologies for high-speed drives in automotive applications. *Transportation Research Procedia*, 55, 995–1002. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.070>
43. Tomše, T., Kubelka, P., Moreno López, R., et al. (2024). Magnetic performance and anticorrosion coating stability of thermally demagnetized Nd-Fe-B permanent magnets for reuse applications. *Materials*, 17(23), 5927. <https://doi.org/10.3390/ma17235927>
44. Rampin, I., Bisaglia, F., & Dabalà, M. (2010). Corrosion properties of NdFeB magnets coated by a Ni/Cu/Ni layer in chloride and sulfide environments. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19, 970–975. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9568-6>
45. Li, Z., Che, S., Zhao, H., et al. (2023). Loss analysis of high-speed permanent magnet motor based on energy saving and emission reduction. *Energy Reports*, 9, 2379–2394. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.053>
46. Millinger, J., Wallmark, O., & Souldard, J. (2018). High-frequency characterization of losses in fully assembled stators of slotless PM motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2265–2275. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2806883>
47. Tian, Y., Liang, S., Wang, F., et al. (2025). Analysis of rotor lamination sleeve loss in high-speed permanent magnet synchronous motor. *Machines*, 13(3), 236. <https://doi.org/10.3390/machines13030236>
48. Papkov, A. V., Berezinets, N. I., Kireev, A. V., & Pak, V. M. (2011). Longevity tests of class-H insulation systems (180 °C) in locomotive traction motors. *Russian Electrical Engineering*, 82(4), 189–191. <https://doi.org/10.3103/S1068371211040134>
49. Nategh, S., Barber, D., Lindberg, D., Boglietti, A., & Aglen, O. (2018). Review and trends in traction motor design: Primary and secondary insulation systems. In *Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506858>
50. Tang, Y., Sun, S., Yu, W., & Hua, W. (2023). Thermal analysis of water-cooling permanent magnet synchronous machine for port traction electric vehicle. *Electronics*, 12(3), 734. <https://doi.org/10.3390/electronics12030734>
51. Poolphaka, P., Jamshidpour, E., Lubin, T., Baghli, L., & Takorabet, N. (2024). Influence of high-frequency operation on the efficiency of a PMSM drive with SiC-MOSFET inverter. *Energies*, 17(10), 2347. <https://doi.org/10.3390/en17102347>
52. Ryu, J.-H., Lee, J.-H., & Lee, J.-S. (2020). Switching frequency determination of SiC-inverter for high efficiency propulsion system of railway vehicle. *Energies*, 13(19), 5035. <https://doi.org/10.3390/en13195035>
53. Cai, W., Wu, X., Zhou, M., Liang, Y., & Wang, Y. (2021). Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles. *Automotive Innovation*, 4, 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z>
54. Ding, X., Du, M., Zhou, T., Guo, H., & Zhang, C. (2017). Comprehensive comparison between silicon carbide MOSFETs and silicon IGBTs based traction systems for electric vehicles. *Applied Energy*, 194, 626–634. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.059>
55. Barta, J., Uzhegov, N., Losak, P., Ondrusek, C., Mach, M., & Pyrhönen, J. (2019). Squirrel-cage rotor design and manufacturing for high-speed applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 6768–6778. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2879285>
56. Azab, M. (2025). A review of recent trends in high-efficiency induction motor drives. *Vehicles*, 7(1), 15. <https://doi.org/10.3390/vehicles7010015>
57. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Jr., & Umans, S. D. (2003). *Electric machinery* (6th ed.). McGraw-Hill.
58. Lee, C.-Y., Chen, B.-K., Lee, W.-J., & Hsu, Y.-F. (1998). Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. *Electric Power Systems Research*, 47(3), 153–

163. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00035-2)
59. Masuku, T. M., Wang, R.-J., Botha, M. C., & Gerber, S. (2019). Design strategy of traction induction motors. In *Proceedings of the 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704761>
60. Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118701591>
61. Levi, E., Bojoi, R., Profumo, F., Toliyat, H. A., & Williamson, S. (2007). Multiphase induction motor drives – a technology status review. *IET Electric Power Applications*, 1(4), 489–516. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060342>
62. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Sushko, D. L., & Kavun, V. Ye. (2018). Znyzhennia dynamichnykh vtrat v aktyvnomu odnofaznomu chotyrykvadrantnomu peretvoriuvachi [Reduction of dynamic losses in an active single-phase four-quadrant converter]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, (51), 88–94. <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.088> [in Ukrainian].
63. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Hordiienko, D. A., et al. (2023). Pidvyshchennia tochnosti modeliuvannia perekhidnykh protsesiv i rozrakhunku vtrat potuzhnosti... v seredovyshchi NI Multisim [Improving the accuracy of simulation of transient processes and calculation of power losses... in the NI Multisim environment]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 28(2), 22–35. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312> [in Ukrainian].
64. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Ivakhno, V. V., et al. (2024). Analiz metodiv keruvannia vypriamno-invertornoho peretvoriuvacha elektrovoza [Analysis of control methods for the rectifier-inverter converter of an electric locomotive]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 29(2), 33–44. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307651> [in Ukrainian].
65. Gobbi, M., Sattar, A., Palazzetti, R., & Mastinu, G. (2024). Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review. *Applied Energy*, 357, Article 122496. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>
66. Rauth, S. S., & Samanta, B. (2020). Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-based FOC. In *Proceedings of the 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>
67. Steigerwald, R. L., & Lipo, T. A. (1979). Analysis of a novel forced-commutation starting scheme for a load-commutated synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-15(1), 14–24. <https://doi.org/10.1109/TIA.1979.4503608>
68. Frikha, M. A., Croonen, J., Deepak, K., et al. (2023). Multiphase motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends. *Energies*, 16(2), 768. <https://doi.org/10.3390/en16020768>
69. Martinez, M., Fernandez, D., Reigosa, D., Guerrero, J. M., & Briz, F. (2018). Wireless torque pulsations measurement system for PMSMs. In *Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557564>
70. Rebollo, E., Platero, C. A., Talavera, D., & Granizo, R. (2019). Use of discharge resistor to improve transient de-excitation in brushless synchronous machines. *Energies*, 12(13), 2528. <https://doi.org/10.3390/en12132528>
71. Rigatos, G., Siano, P., Wira, P., & Profumo, F. (2015). Nonlinear H-infinity feedback control for asynchronous motors of electric trains. *Intelligent Industrial Systems*, 1, 85–98. <https://doi.org/10.1007/s40903-015-0020-y>
72. Babu, P. S. (2016). Harmonic analysis of inverter-fed induction motor drive system under fault conditions using FFT. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(S1), 1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9iS1/108359>
73. Vasyleha, P. O. (2022). *Elektropryvod robochykh mashyn: pidruchnyk* [Electric drive of working machines: textbook]. Sumy State University [in Ukrainian].
74. Youssef, O. E. M., & Shaltout, A. (2015). Starting of loaded induction motors using proposed Volts/Hertz control scheme. In *Proceedings of the 17th International Middle East Power Systems Conference* (pp. 1–6).
75. Travieso-Torres, J. C., Duarte-Mermoud, M. A., Díaz, M., et al. (2022). Closed-loop adaptive high-starting torque scalar control scheme for induction motor variable speed drives. *Energies*, 15(10), 3489. <https://doi.org/10.3390/en15103489>
76. Mencou, S., Yakhlef, M. B., & Tazi, E. B. (2025). Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 14, Article 101098. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101098>
77. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., & Hordiienko, D. A. (2021). Enerhoefektyvni topologii ta alhorytmy moduliatsii v avtonomnykh invertorakh napruhy: monohrafiia [Energy-efficient topologies and modulation algorithms in autonomous voltage

- inverters: monograph]. Planeta-Print [in Ukrainian].
78. Goolak, S., Liubarskyi, B., Riabov, I., et al. (2023). Analysis of the efficiency of traction drive control systems of electric locomotives with asynchronous traction motors. *Energies*, 16(9), 3689. <https://doi.org/10.3390/en16093689>
79. Santisteban, J. A., & Stephan, R. M. (1995). Vector control methods for induction machines: An overview. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(18), 147–151.
80. Struhariňanský, E., Vittek, J., Makyš, P., & Pončiak, J. (2017). Vector control techniques for traction drive with induction machines – comparison. *Procedia Engineering*, 192, 851–856. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.147>
81. Nerubatskyi, V. P. (2025). Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 30(4), 3–21. <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i4.351425>
82. Agrawal, A., Lodhi, R. S., & Nema, P. (2018). A review of speed control methods of induction motor. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(3), 9–14. <https://doi.org/10.9790/1676-1303020914>
83. Sehgal, V., & Rao, C. (2022). Review on speed control methods of induction motor. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9(11), 829–836.
84. Monjo, L., Córcoles, F., & Pedra, J. (2013). Saturation effects on torque- and current-slip curves of squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(1), 243–254. <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2232672>
85. Kondo, M., Ebizuka, R., & Yasunaga, A. (2009). Rotor design for high efficiency induction motors for railway vehicle traction. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382961>
86. Barré, O., & Napame, B. (2017). The insulation for machines having a high lifespan expectancy, design, tests and acceptance criteria issues. *Machines*, 5(1), Article 7. <https://doi.org/10.3390/machines5010007>
87. Hordiienko, A., Iegorov, O., & Potryvaieva, N. (2023). Heat resistance class selection for the stator winding insulation in the circulation pumps induction motors. In *Proceedings of the 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402481>
88. Liu, Y., Chen, Z., Li, W., & Wang, K. (2021). Dynamic analysis of traction motor in a locomotive considering surface waviness on races of a motor bearing. *Railway Engineering Science*, 29, 379–393. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00246-x>
89. Nategh, S., Lindberg, D., Brammer, R., Boglietti, A., & Aglen, O. (2018). Review and trends in traction motor design: Electromagnetic and cooling system layouts. In *Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506817>
90. Khomenko, I. V., Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., et al. (2023). Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, Article 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012040>
91. Yapele, D., Youmssi, A., Boussaibo, A., et al. (2025). Comparative analysis of single-layer and double-layer windings in three-phase squirrel-cage induction machines using FEA and d-q modelling. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 17(2), 15–45. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2025.172002>
92. Panchenko, S. V., Babaiev, M. M., & Nerubatskyi, V. P. (2025). Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. *Zbirnyk naukovykh prats UkrSURT*, (214), 181–200.
93. Sambhavi, Y. V., & Ramachandran, V. (2023). A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy Reports*, 10, 3882–3907. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.056>
94. Poorfakhraei, A., Narimani, M., & Emadi, A. (2021). A review of modulation and control techniques for multilevel inverters in traction applications. *IEEE Access*, 9, 24187–24204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056612>

Нерубацький В. П. Особливості застосування безколекторних двигунів на тяговому рухомому складі.

Анотація. В оглядовому дослідженні розглянуто комплекс технічних, конструктивних та експлуатаційних особливостей сучасних тягових електричних машин безколекторного вентильного та асинхронного типів, що широко застосовують у локомотивобудуванні і транспортних електроприводах. Об'єктом дослідження є електромагнітні, теплові та енергетичні процеси, що протікають у безколекторних вентильних і асинхронних тягових двигунах під час їхньої роботи в

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

системах тягового рухомого складу. Проаналізовано конструктивні особливості безколекторних тягових двигунів, для яких характерні висока енергоефективність, підвищена питома потужність, відсутність механічного колектора, а також можливість забезпечення широких діапазонів регулювання моменту і швидкості за мінімізації обслуговування. Виявлено специфіку робочих процесів у вентильних і асинхронних двигунах, що визначена принципами електромагнітного перетворення, методами керування та реакцією електричної машини на змінні навантаження. Порівняно особливості формування електромагнітного моменту, комутації і теплових режимів цих двигунів у тягових системах. Особливу увагу приділено питанням регулювання частоти обертання асинхронних тягових двигунів, що реалізовано за допомогою перетворювачів частоти зі скалярними, векторними та прямими методами керування. Визначено переваги векторного керування, яке забезпечує динамічну стабільність і максимальне використання перевантажувальної здатності двигуна в режимах тяги і рекуперації. Досліджено конструктивні і технологічні особливості проєктування асинхронних тягових двигунів локомотивів, зокрема вимоги щодо магнітної системи, міцності ротора, систем охолодження та електроізоляційних матеріалів. Узагальнено тенденції розвитку сучасних тягових електричних машин, зокрема впровадження енергоефективних матеріалів, розширення діапазону робочих частот, підвищення теплової надійності та інтеграції двигуна з силовою електронікою в єдині електромеханічні модулі.

Ключові слова: безколекторний тяговий двигун, електрична машина, локомотив, тяговий електропривод, асинхронний двигун, вентильний двигун, перетворювач, енергоефективність.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Стаття надійшла 08.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

ЛЯШЕНКО В. М., Асп.

Український державний університет залізничного транспорту

Порівняльний аналіз оптимізаційних алгоритмів для побудови оптимізованих траєкторій руху рейкового транспорту

Анотація. У цьому дослідженні наведено порівняльний аналіз алгоритмів оптимізації, що застосовують для побудови енергоефективних траєкторій руху поїздів. У рамках дослідження порівняли результати роботи евристичного «жадібного» алгоритму та метод динамічного програмування (DP), заснований на принципі оптимальності Беллмана. Дослідження присвячене фундаментальній проблемі визначення оптимальних траєкторій швидкості як функції часу відстані, які мінімізують споживання енергії за чіткого дотримання графіка руху. Така оптимізація є особливо складною в умовах залізничного транспорту через значні варіації позовжних профілів колій, характеристик рухомого складу та необхідність ухвалення рішень у режимі реального часу. Хоча динамічне програмування гарантує глобально оптимальне рішення, воно потребує значних обчислювальних ресурсів. І навпаки, «жадібні» евристичні алгоритми мають практичні переваги в обчислювальній ефективності та простоті реалізації, проте покладаються на локальні оптимуми. Це дослідження оцінює такі компроміси через моделювання різних операційних сценаріїв. Аналіз показує, що хоча «жадібний» алгоритм досягає швидкості обчислення, яка приблизно в 30 разів перевищує швидкість підходу динамічного програмування, він спричиняє збільшення енергоспоживання до 10 % на складних профілях колій через відсутність попереднього прогнозування. Однак на рівній місцевості різниця в ефективності значно зменшується. Ці результати кількісно оцінюють практичні наслідки вибору алгоритму, слугуючи основою для розроблення гібридних стратегій енергоменеджменту, що враховують вимоги щодо часу обробки даних у системах автоведення поїздів та економічні вигоди від мінімізації енергоспоживання.

Ключові слова: оптимізація траєкторії руху поїздів, міський залізничний транспорт, траєкторії руху, енергоефективність, динамічне програмування, «жадібні» алгоритми.

Вступ.

Підвищення енергетичної ефективності є одним із важливих завдань для залізничних транспортних систем, зокрема міського та приміського сполучення. Витрати електричної енергії на тягу в них є домінуючою часткою повного енергоспоживання підприємством, складаючи 40-60 %. Цей економічний аспект діяльності підприємств у перспективі ставатиме ще більш критичним через постійне підвищення цін на енергоносії та суворіші екологічні норми.

У зв'язку з цим розроблення та впровадження методів, спрямованих на зниження споживання енергії рухомим складом, є актуальним завданням. Один із напрямів його вирішення – це оптимізація траєкторій руху поїздів. Проблема оптимізації руху поїзда ускладнена значною кількістю факторів, що характерні для залізничних перевезень: варіації ухилів, відстані між зупинками, графіки руху, характеристики рухомого складу і т. п. Традиційні підходи щодо вибору стратегій керування поїздами покладено передусім на досвід машиністів і в загальному випадку не використовують весь потенціал енергозбереження.

Розвиток систем автоматичного керування поїздами створив можливості для впровадження більш складних алгоритмів керування, що допомагає розраховувати (наперед або в реальному часі) енергоефективні стратегії керування поїздом.

Існує велика кількість підходів щодо оптимізації, кожен із яких має певні переваги та недоліки. Залежно від вимог щодо надійності системи автоведення поїзда, яка реалізує алгоритм, і її апаратних обмежень швидкий пошук локально оптимального рішення може бути більш пріоритетним за пошук глобально оптимальної траєкторії. Дослідження [1, 2] вказують, що системи автоведення мають генерувати траєкторію руху за час, що обмежений 1-2 с. Тому порівняння ефективності алгоритмів оптимізації можна вважати актуальним. Зрештою, ця робота має на меті поглибити розуміння компромісів, пов'язаних із вибором алгоритмів для енергоефективного керування рухом поїздів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Проблемам оптимізації траєкторій руху поїздів присвячена велика кількість досліджень і публікацій.

При цьому для оптимізації використовують різні методи, що включають такі підходи, як генетичні алгоритми [3], динамічне програмування [4-8], принцип максимуму Понтрягіна [9, 10].

Водночас питання порівняння їх між собою для однакових операційних умов не досліджено досить широко. У дослідженні [3] порівнювали ефективність генетичного алгоритму, алгоритму «мурашиної колонії» та динамічного програмування. За результатами дослідження, лише алгоритм динамічного програмування виявився достатньо стабільним; автори рекомендували завжди використовувати більше одного методу для пошуку оптимізованої траєкторії. У роботі [11] порівнювали алгоритми NSGA-II, опуклої оптимізації та змішаного цілочисельного лінійного програмування, зазначили високі вимоги всіх перелічених алгоритмів щодо обчислювальних потужностей, особливо лінійного програмування, обчислення траєкторій для якого займало більше 3 хв; результати роботи алгоритмів за результуючим рівнем енергозбереження виявилися схожими між собою. В оглядовому дослідженні [12] приділено особливу увагу використанню як методів динамічного програмування, так і принципу максимуму Понтрягіна, автори зазначають, що останній метод є складним у впровадженні через обмеження, які притаманні реальним сценаріям; динамічне програмування позиціоновано як рішення, яке дає змогу зручно працювати з обмеженнями завдяки підвищеній кількості обчислень.

Водночас відсутні дослідження, які б безпосередньо порівнювали евристичні алгоритми, що мають таку перевагу, як дуже швидке обчислення, із більш комплексними методами, такими як динамічне програмування.

Визначення мети та завдання дослідження.

Основною метою цього дослідження є встановлення кількісного оцінювання відмінностей у результаті роботи двох оптимізаційних підходів – евристичного «жадібного» алгоритму та динамічного програмування. Алгоритми протестовані за однакових умов і однакових обмежень, що ізолює їх як єдину змінну, яка впливає на результуюче енергоспоживання.

Методологія дослідження включає створення моделі руху поїзда, що буде обчислювальною основою для реалізації і тестування обох алгоритмів оптимізації. Тестували алгоритми оптимізації, спираючись на результати попереднього дослідження з розроблення типових профілів перегонів метрополітенів, що являють собою різні за складністю

умови руху [13].

Порівняння зосереджено саме на енергоспоживанні як основному показнику ефективності. Витрати енергії визначають за оборот рухомого складу, тобто сумарно за проходження перегону в обидва боки, за фіксованого графікового часу руху.

Виклад основної частини матеріалу.

Оптимізація траєкторії руху будь-яких транспортних засобів є задачею оптимального керування. Вона передбачає визначення оптимального закону керування u і результуючого профілю швидкості як функції координати поїзда ($u(s)$ і $v(s)$) або часу ($u(t)$ і $v(t)$), що мінімізує певну функцію вартості, одночасно задовольняючи вимоги щодо обсягу перевезень та експлуатаційні обмеження. Цей процес зазвичай спрямований на мінімізацію спожитої енергії A ; залежно від пріоритетів можуть бути розглянуті й інші, альтернативні, цілі, наприклад мінімізація часу в дорозі.

Задачу оптимізації траєкторії руху можна загалом подати як

$$\min_{v(\cdot)} \int_0^t P(v(t), u(t)) dt : t \leq T_3, v(t) \leq v_{max}, \dots \quad (1)$$

де $P(v(t), u(t))$ – потужність, розвинута рухомим складом, залежно від траєкторії руху $v(t)$ і сигналу керування $u(t)$, кВт·год;

$v(t)$ – траєкторія руху рухомого складу (швидкість) у функції часу, м/с;

t – час, с;

T_3 – заданий (графіковий) час руху по перегону, с;

v_{max} – обмеження швидкості руху за умовами перегону або конструкційної швидкості рухомого складу, м/с.

Для розв'язання задачі оптимізації можна використовувати різні підходи, які умовно поділяють на три широкі категорії.

До першої категорії належать евристичні та метаевристичні методи. Евристичні методи покладаються на пошук «достатньо хороших» рішень

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

із використанням незначної кількості часу, наприклад вибір на кожному послідовному кроці оптимізації такої швидкості, яка локально мінімізує витрати енергії або час проходження сегмента перегону. Недоліком подібних методів є ухвалення рішень лише на основі локального оптимуму («жадібність»), через що вони можуть не призводити до глобально кращих рішень. Метаевристичні алгоритми, куди входять алгоритм оптимізації мурашиної колонії (*ant colony optimization, ACO*) і генетичні алгоритми (*genetic algorithms, GA*) є алгоритмами більш високого рівня, які використовують декілька евристик для балансу між пошуком у полі рішень і використанням цих рішень. Найбільшою проблемою цих підходів є відсутність гарантії глобального оптимуму; до того ж якість результату може бути чутливою до налаштувань алгоритмів.

До другої категорії можна віднести оптимальне керування з використанням принципу максимуму Понтрягіна, за яким проблему оптимізації траєкторії розглядають як неперервну функцію. За оптимального керування встановлені векторна функція стану об'єкта $x(t)$ (наприклад положення у просторі та швидкість) і функція керування $u(t)$, величини якої вибирають із поля рішень U . Задача оптимізації зведена до мінімізації (або максимізації) функції вартості:

$$J = \int_{t_0}^t L(x(t), u(t)) dt \quad (2)$$

Динамічне програмування являє собою принципово інший підхід щодо оптимізації траєкторії. Метод оперує принципом оптимальності Беллмана, який встановлює, що оптимальна послідовність рішень зберігає свою властивість оптимальності на кожному проміжному етапі – це означає, що, незалежно від того, як система досягла певного стану, подальші рішення мають становити оптимальну політику з цього моменту і надалі. Від принципу

Таблиця 1

Умовний профіль типу I («легкий»)

Довжина ділянки, м	150	200	200	200	150	100
Ухил ділянки, ‰	3	10	-3	3	10	0

максимуму Понтрягіна динамічне програмування відрізняється насамперед своїм дискретним характером. Для розв'язання задачі оптимізації методом Беллмана неперервний стан x розбивають на дискретну послідовність. Нехай $J_i(x)$ є мінімальною «вартістю» від кроку i до кінця сітки за стану x , тоді рівняння Беллмана

$$J_i(x) = \min_u \{l_i(x, u) + J_{i+1}(f_i(x, u))\}, \quad (3)$$

де l_i – вартість одного кроку;

f_i – функція зміни стану за законом керування u .

Дискретна природа динамічного програмування структурно є дуже схожою на процес керування потягом, оскільки в обох випадках сутність керування полягає в серії дискретних рішень через певні проміжки колії або часові інтервали.

Для виконання оптимізації руху поїзда в даному дослідженні заданий перегін розбито на n окремих незалежних сегментів, причому рух поїзда розглядають у функції шляху s , м. Сегменти є кроками оптимізації; кожний сегмент має відповідне значення профілю перегону i , ‰. Довжина сегмента (дискретність розбивки) задана наперед перед моделюванням і прийнята достатньо малою (5-10 м) для зменшення її впливу на точність розрахунків. Якщо сегмент містить перелом профілю, він додатково розбитий на два менших сегменти, зберігаючи в такий спосіб поздовжній профіль перегону.

Для моделювання руху поїзда були використані умовні профілі перегонів трьох типів, що були запропоновані в попередньому дослідженні [13], із незначними змінами (табл. 1-3).

Таблиця 2

Умовний профіль типу II («середній»)

Довжина ділянки, м	150	50	150	50	100	250	400	50	100
Ухил ділянки, ‰	-5	30	30	3	3	3	-11	-17	0

Таблиця 3

Умовний профіль типу III («важкий»)

Довжина ділянки, м	150	50	200	200	50	100	50	300	400	50	50	100
Ухил ділянки, ‰	5	5	35	5	3	3	3	40	30	30	5	0

Додатково для порівняння введено умовний профіль «нульового» типу, що являє собою пряму ділянку довжиною 1000 м із незначним ухилом – 3 ‰.

Модель, що використана для оптимізації траєкторії руху поїзда, можна уявити як таку, що складається з двох структурних компонентів:

- модель динаміки рухомого складу (модель руху поїзда), що відображає вплив на рух поїзда сигналу керування $u(n)$ з урахуванням його навантаження, тягової характеристики та умов профілю;

- власне модель керування та оптимізації, відповідальну за вибір сигналу керування $u(n)$.

Оптимізація траєкторії руху поїзда є задачею визначення закону керування $u(n)$, який можна уявити як положення контролера машиніста в кожній точці шляху; тобто оптимізація є в цьому випадку визначенням послідовності застосування тягового або гальмівного зусилля, ураховуючи поточний стан поїзда (положення в просторі, швидкість) і бажаний результат (початок руху та зупинка в заданих точках). Критерієм оптимальності є досягнення кінцевої точки без перевищення графікового часу руху по перегону T_S , с, і з мінімальними витратами електричної енергії A , кВт·год.

Рух поїзда, а отже, величина його прискорення або уповільнення залежить від сили тяги F , гальмівної сили B , величини сумарного опору рухові W , маси поїзда P , коефіцієнта обертових мас γ та описана основним рівнянням руху поїзда

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - B - W}{P} \cdot \frac{g}{(1 + \gamma)} \quad (4)$$

де F – сила тяги, кН;

B – гальмівна сила, кН;

W – сумарний опір рухові, кН;

P – вага поїзда, кН;

g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Система рівнянь, що описує роботу тягового привода поїзда на n -й ділянці, має такий вигляд:

$$F_n = \begin{cases} \min \left\{ \begin{aligned} & [F_{max} f(V, N')] \cdot u_n, \quad 0 < u \leq 1 \\ & 0, u = 0 \\ & B_{max} \cdot u_n, \quad -1 \leq u < 0 \end{aligned} \right\}, \\ \end{cases} \quad (5) \quad l_n(V_n, u_n) = A_n(u_n) + \lambda t_n(u_n), \quad (7)$$

де F_n – сила тяги поїзда на n -й ділянці перегону, кН;

F_{max} – максимальне значення сили тяги моторного вагона за умови обмеження струму або зчеплення коліс із рейками, кН;

B_{max} – максимальне значення гальмівної сили моторного вагона за умови обмеження струму або зчеплення коліс із рейками, кН ($B_{max} = -F_{max}$);

$f(V, N')$ – тягова характеристика моторного вагона залежно від швидкості руху та потужності тягового привода;

V – швидкість руху, км/год;

u_n – сигнал керування («коефіцієнт тяги») на n -й ділянці.

Витрати електроенергії на проходження будь-якої ділянки перегону A_n , кВт·год, для моделювання можна визначити як

$$A_n = \begin{cases} \frac{\sum N_n \Delta t_n}{\eta \cdot 3600}, & F_n > 0 \\ 0, & F_n \leq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

де N_n – сумарна розвинута потужність тягового привода поїзда на n -й ділянці;

η – повний коефіцієнт корисної дії тягового привода ($\eta = 0,8 \dots 0,9$);

Δt_n – час проходження n -ї ділянки;

3600 – коефіцієнт переходу від секунд до годин.

Вибір певного значення $u(n)$ на кожній ділянці шляху є компромісом між витратами електричної енергії на рух поїзда і часом на проходження заданої ділянки та перегону в цілому. Для цього в процес вибору значення $u(n)$ на кожній ділянці шляху введена функція вартості, що відображає «ціну» кожного варіанта; для однієї ділянки n вона складає

де λ – невизначений множник Лагранжа.

Два алгоритми оптимізації, що використані в цьому дослідженні, мають різні підходи щодо визначення закону керування $u(n)$.

Динамічне програмування покладено на попереднє повне обчислення всіх допустимих комбінацій (n, V_n, u_n) . Це дає змогу використати рекурсивне рівняння Беллмана, яке для комбінації (n, V_n, u_n) буде включати аналогічне рівняння для наступної ділянки $n+1$, тобто умовну вартість проходження всіх наступних ділянок:

$$J_n(V_n, u_n) = \min_{-1 \leq u_n \leq 1} \{A_n(u_n) + \lambda t_n(u_n) + J_{n+1}(V'_{n+1}, u'_{n+1})\} \quad (8)$$

Після проходження всіх n ділянок у зворотному порядку вибудовують таблицю вартості всіх можливих комбінацій $J_n(V_n, u_n)$, після чого отримують оптимізований закон керування $u = f(n)$. Цього досягають, вибираючи на кожній ділянці n таке u_n , якому відповідає найменше значення функції вартості J .

«Жадібний» алгоритм, на відміну від динамічного програмування, є методом прямого проходу, тобто закон керування отримують послідовно, починаючи з початку. Для кожного сегмента перегону n вибирають таке значення $u(n)$, яке відповідає найменшому значенню функції вартості (формула (7)), при цьому попередні результати або наступні сегменти не враховують:

$$u_n = \min_{-1 \leq u_n \leq 1} \{A_n(u_n) + \lambda t_n(u_n)\} \quad (9)$$

Порівнюючи алгоритми, для кожної заданої середньої швидкості руху по перегону (якій відповідає певний цільовий час проходження перегону T_z) будують оптимізовані траєкторії для руху у прямому та зворотному напрямках. Витрати енергії сумують. Приклади роботи алгоритмів наведені на рис. 1-3. Синім кольором на них показані швидкості руху; помаранчевим – сигнали керування; суцільні лінії відповідають результатам динамічного програмування, переривчасті – «жадібному» алгоритму.

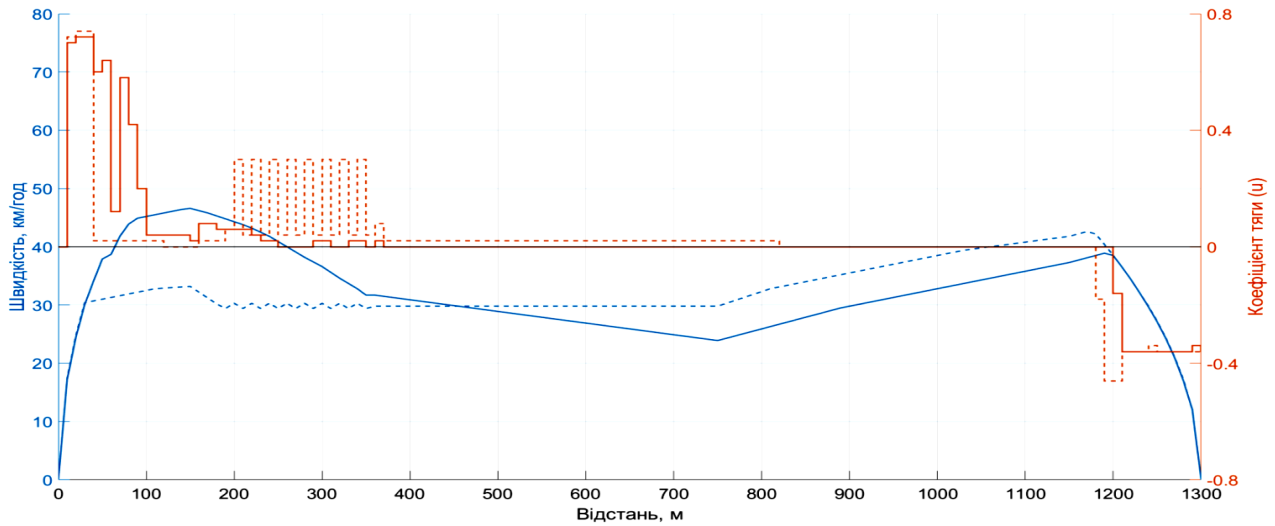


Рис. 1. Результати оптимізації для умовного профілю типу II (рух у прямому напрямку, середня швидкість 25 км/год)

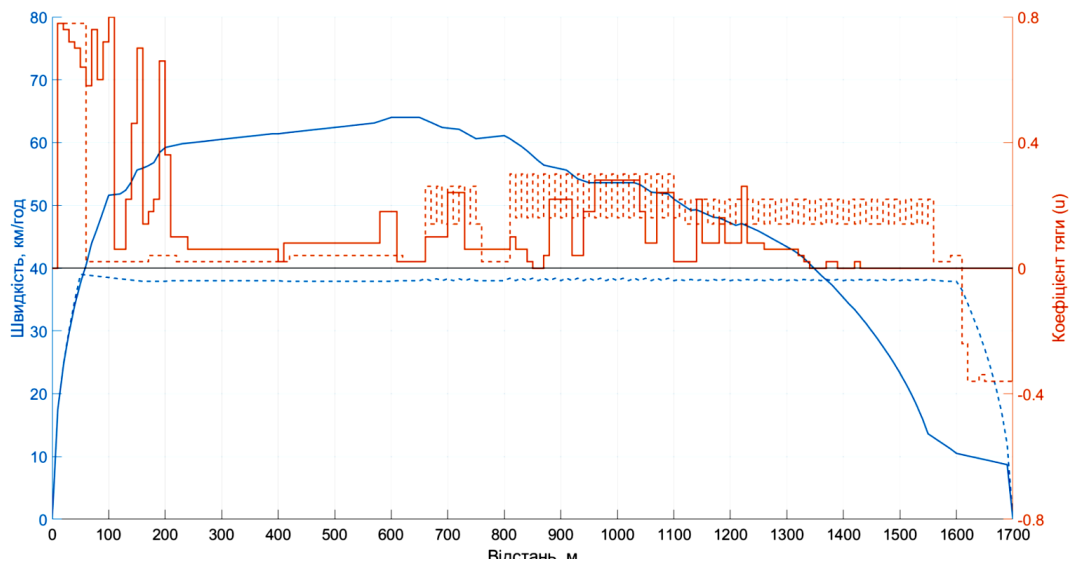


Рис. 2. Результати оптимізації для умовного профілю типу III (рух у прямому напрямку, середня швидкість 35 км/год)

Швидкодія алгоритмів і швидкість побудови ними оптимізованої траєкторії значно розрізняються, на неї впливають умови профілю (передусім довжина, а отже, кількість сегментів). Для профілю типу III у випадку динамічного програмування час розрахунку складає приблизно 55 с, із них 5 с займає розрахунок таблиці переходів і 50 с – ітеративний підбір невизначеного множника Лагранжа λ . Для

«жадібного» алгоритму, який не потребує попереднього розрахунку повної таблиці переходів, час побудови оптимізованої траєкторії зазвичай не перевищує 2 с.

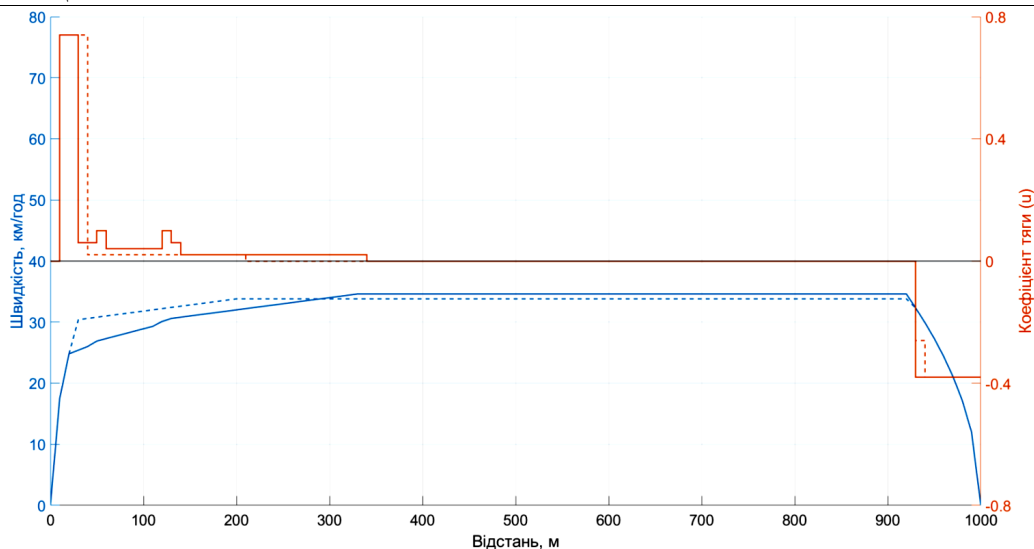


Рис. 3. Результати оптимізації для умовного профілю типу 0 (рух у зворотному напрямку, середня швидкість 30 км/год)

Результати розрахунків роботи алгоритмів оптимізації наведені в табл. 4-7, а також відображені на порівняльному графіку (рис. 4).

Таблиця 4

Витрати енергії для умовного профілю типу 0 («нульовий»)

Середня швидкість, км/год	«Жадібний» алгоритм			Динамічне програмування		
	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт
20	8,39	3,38	11,77	6,85	3,28	10,13
25	8,65	5,54	14,19	7,59	5,42	13,01
30	9,39	6,65	16,04	8,57	6,53	15,1
35	10,44	8,2	18,64	9,71	7,85	17,56
40	12,16	10,47	22,63	11,74	10,19	21,93
45	15,41	13,87	29,28	15,19	13,57	28,76

Таблиця 5

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Витрати енергії для умовного профілю типу I («легкий»)

Середня швидкість, км/год	«Жадібний» алгоритм			Динамічне програмування		
	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт
20	9,98	3,1	13,08	7,44	3,05	10,49
25	9,99	4,95	14,94	8,2	4,8	13
30	10,18	6,41	16,59	9,03	6,33	15,36
35	11,18	8,12	19,3	10,3	8,04	18,34
40	12,92	10,24	23,16	12,27	9,95	22,22
45	16,16	13,74	29,9	15,52	13,68	29,2

Таблиця 6

Витрати енергії для умовного профілю типу II («середній»)

Середня швидкість, км/год	«Жадібний» алгоритм			Динамічне програмування		
	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт
20	7,64	7,9	15,54	12,98	11,96	24,94
25	8,96	8,53	17,49	12,16	11,22	23,38
30	9,71	10,05	19,76	11,75	11,36	23,11
35	10,84	10,51	21,35	12,47	12,06	24,53
40	12,5	12,04	24,54	13,4	13,71	27,11
45	14,77	14,54	29,31	15,87	16,13	32

Таблиця 7

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ
Витрати енергії для умовного профілю типу III («важкий»)

Середня швидкість, км/год	«Жадібний» алгоритм			Динамічне програмування		
	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт	Прямий напрямок, кВт	Зворотний напрямок, кВт	Сумарні, кВт
20	41,96	1,61	43,57	23,73	1,16	24,89
25	35,96	1,3	37,26	22,48	1,3	23,78
30	31,83	1,71	33,54	22,55	1,66	24,21
35	29,54	2,39	31,93	22,66	2,4	25,06
40	28,21	3,37	31,58	22,96	3,15	26,11
45	30,53	5,09	35,62	23,63	4,91	28,54

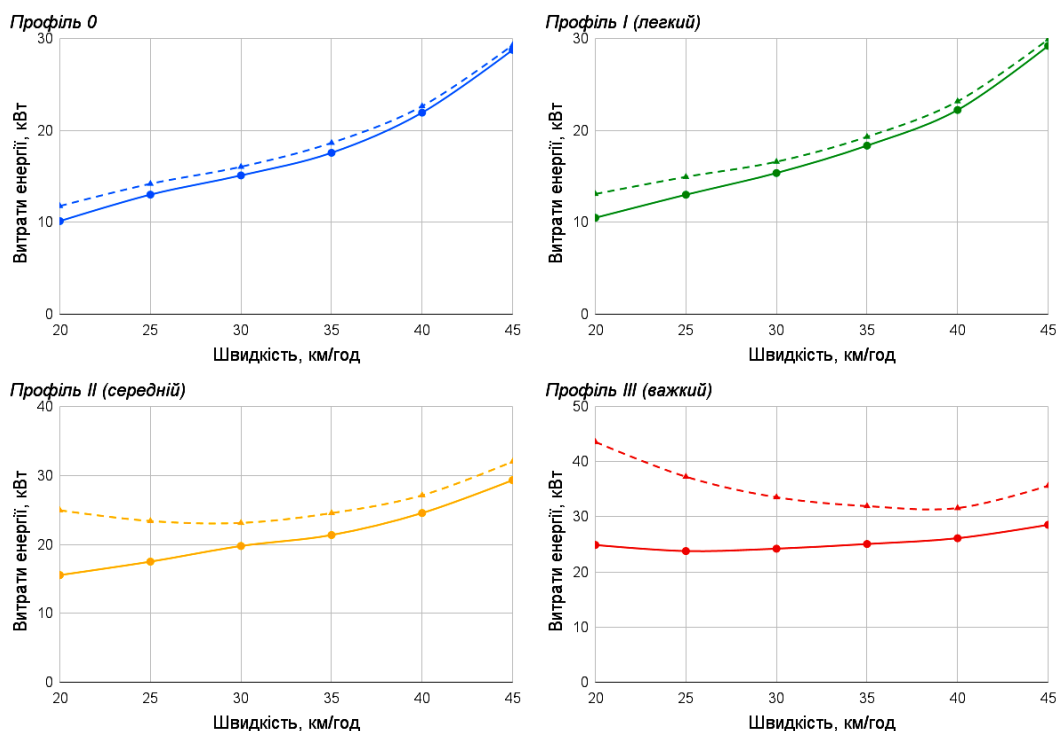


Рис. 4. Порівняльний графік енерговитрат за різних методів оптимізації

Висновки.

У результаті дослідження було проведено

пряме порівняння результатів роботи різних методів оптимізації траєкторії руху поїзда в однакових умовах – динамічного програмування та «жадібного»

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

алгоритму пошуку локального мінімуму. Для порівняння використана модель, що поєднує симуляцію динаміки рухомого складу та побудову оптимізованих траєкторій двома різними алгоритмами. Розраховували траєкторії для чотирьох умовних профілів перегонів, типових для міських рейкових транспортних систем.

Моделювання дало змогу кількісно оцінити результативність роботи алгоритмів за критерієм енергоспоживання. Результати моделювання показують, що «жадібний» алгоритм у деяких випадках демонструє результати, що наближаються до результатів динамічного програмування. Істотне розходження спостерігають лише на III (важкому) профілі, а також на швидкостях менше 30 км/год на II профілі (середньому). На легших профілях збільшення витрат за «жадібного» алгоритму порівняно з динамічним програмуванням не перевищує 10 %. Було встановлено, що швидкість побудови квазіоптимальної траєкторії руху «жадібним» алгоритмом перевищує таку для динамічного програмування майже у 30 разів і вкладається в запропоноване для систем автоведення обмеження 2 с на розрахунок.

Результати дослідження показують, що алгоритми оптимізації, що не гарантують глобальної оптимальності, можуть мати користь у контексті залізничних операцій завдяки своїм перевагам. Тому перспективним напрямом подальших досліджень є порівняння динамічного програмування з іншими алгоритмами, що не потребують великого обсягу обчислень і можуть бути виконані за короткий час системами автоведення поїздів. Ці дослідження можуть надати глибший контекст для розуміння порівняних переваг і недоліків різних підходів щодо оптимізації та їхнього потенціалу для використання в задачах, характерних для транспортних система.

Список використаних джерел

1. Patrick Bochmann, Birgit Jaekel. Measures and Methods for the Evaluation of ATO Algorithms. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12 (9). P. 4570. DOI: 10.3390/app12094570.
2. Jiateng Yin. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. Vol. 85. P. 548-572. DOI: 10.1016/j.trc.2017.09.009.
3. Single-Train Trajectory Optimization / Shaofeng Lu, Stuart Hillmansen, Mark Ho, Clive Roberts. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013. Vol. 14, No. 2. P. 743–750. DOI: 10.1109/TITS.2012.2234118.

4. Energy-efficient train control in urban rail transit systems / Shuai Su, Tao Tang, Bo Liu. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014. Vol. 229, № 4. DOI: 10.1177/0954409713515648.
5. Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: a dynamic programming based approach / Yerang Huang, Lixing Yang, Tao Tang, Ziyou Gao, Fang Cao, Keping Li. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 126. P. 149–164. DOI: 10.1016/j.cie.2018.09.024.
6. A Novel Dynamic Programming Approach for Optimizing Driving Strategy of Subway Trains / Hao Gao, Yadong Zhang, Jin Guo. *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 325. DOI: 10.1051/mateconf/202032501002.
7. Yeun Sub Byun, Rao Gyo Jeong. Optimization of Driving Speed of Electric Train Using Dynamic Programming Based on Multi-Weighted Cost Function. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 24. P. 12857. DOI: 10.3390/app122412857.
8. Train trajectory optimization for improved on-time arrival under parametric uncertainty / Pengling Wang, Alessio Trivella, Rob M. P. Goverde, Francesco Corman. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. 2020. Vol. 119. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102680.
9. Eugene Khmelnskiy. On an Optimal Control Problem of Train Operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2000. Vol. 45, No. 7. P. 1257–1266. DOI: 10.1109/9.867018.
10. Wolfram Heineken. Energy-Efficient Train Driving Based on Optimal Control Theory. *Energies*. 2023. Vol.16 (18). P. 6712. DOI: 10.3390/en16186712.
11. Comparative Performance Analysis of Speed Trajectory Optimization Algorithms for Metro and High-speed Railways / Xiao Liu, Yang Peng, Zhongbei Tian, Shaofeng Lu, Lin Jiang, Minwu Chen. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2025. Vol. 11 (4). P. 9000-9010. DOI: 10.1109/TTE.2025.3544112.
12. Scheepmaker. Review of energy-efficient train control and timetabling / Gerben M. Scheepmaker, Rob M. P. Goverde, Leo G. Kroon. *European Journal of Operational Research*. Vol. 257 (2). P. 355-376. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.09.044.
13. Ляшенко В. М., Устенко О. В., Яцько С. І. Дослідження витрат електроенергії за повторно-короткочасного режиму роботи електрорухомого складу на ділянках різного профілю. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2025. Вип. 211. С. 181-195. DOI: 10.18664/1994-7852.211.2025.327149.

References

1. **Bochmann, P., & Jaekel, B. (2022).** Measures and methods for the evaluation of ATO algorithms. *Applied Sciences*, 12(9), Article 4570. <https://doi.org/10.3390/app12094570>
2. **Yin, J. (2017).** Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85, 548–572. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.09.009>
3. **Lu, S., Hillmansen, S., Ho, M., & Roberts, C. (2013).** Single-train trajectory optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 743–750. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2234118>
4. **Su, S., Tang, T., & Liu, B. (2014).** Energy-efficient train control in urban rail transit systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(4). <https://doi.org/10.1177/0954409713515648>
5. **Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., & Li, K. (2018).** Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.024>
6. **Gao, H., Zhang, Y., & Guo, J. (2020).** A novel dynamic programming approach for optimizing driving strategy of subway trains. *MATEC Web of Conferences*, 325, Article 01002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032501002>
7. **Byun, Y. S., & Jeong, R. G. (2022).** Optimization of driving speed of electric train using dynamic programming based on multi-weighted cost function. *Applied Sciences*, 12(24), Article 12857. <https://doi.org/10.3390/app122412857>
8. **Wang, P., Trivella, A., Goverde, R. M. P., & Corman, F. (2020).** Train trajectory optimization for improved on-time arrival under parametric uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 119, Article 102680. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102680>
9. **Khmelnijskiy, E. (2000).** On an optimal control problem of train operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(7), 1257–1266. <https://doi.org/10.1109/9.867018>
10. **Heineken, W. (2023).** Energy-efficient train driving based on optimal control theory. *Energies*, 16(18), Article 6712. <https://doi.org/10.3390/en16186712>
11. **Liu, X., Peng, Y., Tian, Z., Lu, S., Jiang, L., & Chen, M. (2025).** Comparative performance analysis of speed trajectory optimization algorithms for metro and high-speed railways. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 11(4), 9000–9010. <https://doi.org/10.1109/TTE.2025.3544112>
12. **Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017).** Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355–376. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>
13. **Liashenko, V. M., Ustenko, O. V., & Yatsko, S. I. (2025).** Doslidzhennia vytrat elektroenerhii za povtorno-korotkochasnoho rezhymu roboty elektrorukhomoho skladu na diliankakh riznoho profilu [Research of electricity consumption under repeated short-term operation mode of electric rolling stock on sections of different profiles]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrSURT*, (211), 181–195. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327149> [in Ukrainian].

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR ENERGY EFFICIENT TRAIN TRAJECTORIES

Postgraduate student V. M. Lyashenko

Abstract. This study presents a comparative analysis of optimization algorithms applied to the generation of energy-efficient train speed profiles. Specifically, the research contrasts the performance of heuristic «greedy» algorithms against Dynamic Programming (DP) methods based on Bellman's principle of optimality. The study addresses the fundamental problem of determining optimal speed-time or speed-distance trajectories that minimize energy consumption while strictly adhering to schedule constraints. This optimization is particularly complex in railway environments due to significant variations in longitudinal track profiles, rolling stock characteristics, and the necessity for real-time decision-making.

While Dynamic Programming guarantees a globally optimal solution, it demands significant computational resources. Conversely, greedy heuristics offer practical advantages in computational efficiency and implementation simplicity but rely on local optima. This research evaluates these trade-offs by simulating various operational scenarios. The analysis demonstrates that while the greedy algorithm achieves calculation speeds approximately 30 times faster than the DP approach, it incurs an energy consumption penalty of up to 10 % on complex track profiles due to a lack of predictive foresight. On flat terrain, however, the performance gap narrows significantly. These results quantify the practical consequences of algorithm selection, serving as a basis for developing hybrid energy management strategies that balance the computational latency requirements of automatic train operation systems with the economic benefits of energy minimization.

Keywords: *train trajectory optimisation, urban rail transport, speed profiles, energy efficiency, dynamic programming, «greedy» algorithms.*

Ляшенко Вадим Михайлович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>. Тел.: +38 (099)930-98-82.

Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>. Tel.: +38 (099)930-98-82.

Стаття надійшла 02.12.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

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

Liashenko Vadym, Postgraduate, Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and

Редакційн колегія журналу «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» в складі:

Головний редактор: Панченко Сергій Володимирович - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Випусковий редактор – Харін Руслан Олександрович, Український державний університет залізничного транспорту

Члени редакційної колегії:

Мойсеєнко Валентин Іванович - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Трубчанінова Карина Артурівна - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Каргін Анатолій Олексійович - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Доценко Сергій Ілліч - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Дегтярьов Олександр Валентинович - кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки

Самсонкін Валерій Миколайович - доктор технічних наук, професор Національний транспортний університет

Заболотний Олександр Віталійович - доктор технічних наук, професор, декан факультету інтелектуальних систем управління, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Павел Снятала - професор Познанського технологічного університету, Інститут інформатики, Познань, Польща

Руцький Мирослав - професор Радомського університету імені Казимира Пуласкі (Радом, Польща)

© Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" Informacijoje 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 № 03 від 16 березня 2026 р.

Рецензування проводиться конфіденційно за принципами double-blind

Статті друкуються мовою оригіналу

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

Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції журналу

Індекс журналу у Каталозі передплатних видань України – 48707

*Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50, площа Фейсбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 318.
Тел.: (057) 730-19-37, 730-10-82. E-mail: . ikst.ukrsurt@ukr.net*

Редактор Ібрагімова Н. В.

*Підписано до друку 16.03.2026р. 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.*